



Universidad
Zaragoza



TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN FÍSICA Y TECNOLOGÍAS FÍSICAS

Diseño de un detector de neutrones cósmicos

AUTORA:

TAMARA PARDO YANGUAS

DIRECTORAS:

DRA. GLORIA LUZÓN MARCO

DRA. THEOPISTI DAFNÍ

Departamento de Física Teórica

Área de Física Atómica, Molecular y Nuclear

Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza

Junio de 2021

Abstract

The IAXO experiment is a proposed axion helioscope that intends to detect solar axions. Axions are hypothetical particles motivated by the strong CP problem, that are also postulated as candidates for Dark Matter. According to previous studies, cosmic particles, mainly muons and neutrons, are one of the main sources of background. Cosmic neutrons, due to their nature of interaction, constitute the predominant contribution. The aim of this study is to design a cosmic neutron detector motivated by the lack of commercial resources in the high-energy neutron detection. With this device, it is expected to measure the cosmic neutron flux with accuracy. This measurement will allow to improve the estimation of the actual veto system's efficiency. After extensive studies of different aspects of the detection efficiency and material selection of the device, a conceptual design of the detector setup has been reached, which indeed has been virtually fixed keeping in mind important engineering and economical constraints. The majority of this work has focused on devising a shielding in order to optimise neutron detection and to minimise the gamma background. Starting from the outside, the shielding consists of a 5 cm lead shielding, a 10 cm polyethylene shielding, and a 5 cm lead shielding. The results obtained are competitive enough and meet the expectations of the group: (3793 ± 22) counts per hour associated with cosmic neutrons, and a GARRn that descends to $0,305 \pm 0,003$. The features just exposed justify the construction of the device in the medium to long term. The detector will be potentially operated at DESY (Germany), where IAXO is proposed to be sited, in order to increase the rejection of this experiment to signals that are due to this background.

Resumen

El experimento IAXO es un futuro helioscopio solar que persigue la detección del axión, una partícula hipotética motivada por el problema CP fuerte, que además se postula como un sólido candidato a Materia Oscura. Estudios del modelo de fondo realizados en el marco de este proyecto han concluido que los neutrones cósmicos suponen la contribución dominante al fondo, incluso por encima del nivel asociado a muones cósmicos, ya que los sucesos causados por estos últimos pueden ser vetados fácilmente, no así en el caso de los eventos causados por neutrones. Dada la falta de recursos disponibles en el mercado para la detección de neutrones de alta energía, el objetivo de este trabajo es el diseño desde cero de un detector de neutrones cósmicos con herramientas y tecnologías en las que el grupo de investigación es experto. Con este dispositivo se pretende medir con exactitud el flujo de estas partículas que alcanza el experimento, lo que permitirá estimar con mayor precisión la eficiencia del sistema de vetos actual. El análisis de una serie de configuraciones básicas ha permitido guiar y conformar el diseño de un detector, que ha acabado fijándose atendiendo a restricciones ingenieriles y económicas. El grueso de este trabajo se ha dirigido a la concepción de una estructura de blindaje que optimice la estadística de neutrones y que minimice la inherente presencia de un fondo gamma, ambos provenientes de los rayos cósmicos. Comenzando desde el exterior al centro del conjunto, se proponen 5 cm de plomo, a continuación, 10 cm de polietileno y, más adelante, 5 cm de plomo rodeando por completo la vasija cilíndrica. Los resultados obtenidos se consideran competitivos y cumplen las expectativas fijadas al inicio del trabajo: (3793 ± 22) sucesos/hora debidos a neutrones cósmicos y un valor de GARRn de $0,305 \pm 0,003$. Estas prestaciones justifican la construcción del detector por parte del grupo en el futuro más próximo. El dispositivo concebido tiene el potencial de instaurarse en DESY (Alemania), emplazamiento del proyecto IAXO, bajo el propósito de aumentar la capacidad de rechazo del experimento a señales debidas a este fondo.

Índice general

1. Introducción	1
2. Neutrones cósmicos	4
2.1. Detectores de neutrones	5
2.2. Estudio de secciones eficaces	6
3. Simulaciones	9
3.1. Herramientas y metodología	9
3.2. Simulaciones previas	12
4. Diseño del detector	15
4.1. Descripción del diseño	15
4.2. Implementación de la geometría	17
4.3. Respuesta del detector	20
5. Conclusiones	28
Bibliografía	30
A. Secciones eficaces	31
B. Estudios previos	34
B.1. Incorporación de láminas	34
B.2. Blindaje entero de plomo e incorporación de láminas	39

Capítulo 1

Introducción

La imagen actualmente aceptada del Universo revela que la materia bariónica que compone todo lo conocido supone menos del 5 % del total del Cosmos. El 95 % restante, el lado oscuro del Universo, está compuesto por dos elementos todavía desconocidos, la Energía Oscura y la Materia Oscura, que suponen un 68,3 % y un 26,8 % respectivamente [1]. A día de hoy, el reto más ambicioso al que se enfrenta la Física de Partículas es entender la naturaleza de estas dos sustancias, para lo cual el Modelo Estándar, pese a su éxito, no ofrece una explicación fundamental.

Entre las partículas propuestas para resolver el enigma de la Materia Oscura se encuentran partículas con constantes de acoplo pequeñas y baja masa, llamadas WISPs (*Weakly Interacting Slim Particles*), entre las que destaca el axión, y partículas masivas de interacción débil, denominadas WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*). El axión es una partícula hipotética, pseudoescalar, elusiva, neutra y muy ligera que surge como consecuencia de aplicar el mecanismo de Peccei-Quinn al problema CP fuerte. En [2–4] se puede encontrar una revisión muy completa de esta partícula.

En los últimos años, la hipótesis de que el axión pueda ser un importante constituyente de la Materia Oscura ha intensificado el interés de la comunidad científica en implementar y actualizar técnicas experimentales para la búsqueda de estas partículas. El helioscopio de axiones, un tipo de telescopio que apunta al Sol y que busca axiones potencialmente generados en esta fuente natural, sobresale como una de las tecnologías más avanzadas en el proceso de detección. En este contexto, el experimento IAXO (*International AXion Observatory*) es actualmente uno de los proyectos internacionales más prestigiosos y competitivos [5]. En él colaboran una centena de científicos de primer nivel entre los que se encuentran miembros del Grupo de Física Nuclear y Astropartículas (GIFNA) de la Universidad de Zaragoza. Las tareas delegadas al grupo se centran en la investigación en detectores de rayos X de ultra-bajo fondo, en concreto, al desarrollo de detectores Micromegas.

Tanto IAXO como su prototipo BabyIA XO [6] operarán al nivel del mar y, en consecuencia, requerirán de un muy bajo nivel de fondo radiactivo. Como en cualquier experimento de *sucesos raros*, el número de señales esperado es muy bajo y puede quedar oculto por sucesos de fondo. En consecuencia, gran parte de los esfuerzos a día de hoy se dirigen a conocer estos fondos. Estudios de rayos cósmicos realizados en el marco del proyecto IAXO han indicado que muones y neutrones cósmicos suponen la contribución dominante del modelo de fondo [7]. La señal esperada en los detectores de axiones solares son depósitos puntuales de energía en la región de menos de 8 keV, por lo que la mayor parte de de estos neutrones causan interacciones fácilmente distinguibles de los sucesos de señal. No obstante, una modesta fracción correspondiente a pequeñas interacciones de gammas o neutrones tendrá justo estas características, por lo que su señal será indistinguible de los rayos X que buscan los detectores de IAXO. Con el fin de eliminar este fondo, es imprescindible diseñar un sistema de blindaje pasivo, el cual bloquea el fondo gamma, y uno de vetos activos, destinado a identificar muones y neutrones, en torno a los detectores.

A nivel del mar, los muones constituyen la especie de partícula más abundante de la radiación cósmica secundaria. Las simulaciones más recientes realizadas en el contexto de IAXO sitúan el nivel de fondo debido a estas partículas en $(8,0 \pm 0,4) \times 10^{-4} \text{ keV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [8]. Al tratarse de radiación energética y altamente ionizante, estas partículas atraviesan todo el sistema de detector y blindaje, depositando energía a su paso de forma continua. En consecuencia, la estrategia universal para reducir su contribución es emplear detectores auxiliares especializados en una configuración de veto activo rodeando al detector. Con ello, se pretende etiquetar, o descartar, las señales que se producen en coincidencia con estos plásticos centelleadores. Se ha demostrado que eligiendo deliberadamente su geometría, estos dispositivos pueden llegar a alcanzar una eficiencia muy alta que roza el 100 %. De esta forma, con el sistema de vetos y con un filtrado a posteriori, es posible reducir el fondo de estas partículas en tres órdenes de magnitud [8].

El nivel de fondo de neutrones cósmicos se estima en $(1,222 \pm 0,006) \times 10^{-5} \text{ keV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [8]. Aunque el nivel sin filtrar es menor que el de muones cósmicos, el sistema de vetos a neutrones no es tan eficiente como en el caso de los muones. El motivo es que las interacciones de los neutrones cósmicos están caracterizadas por la producción de ingentes cantidades de partículas secundarias que se propagan por el experimento en una trayectoria que no es recta alcanzando típicamente varios vetos. De esta forma, la detección de neutrones a través del método de anticoincidencia se ve dificultada por la propia naturaleza de la interacción de estas partículas, que es significativamente más compleja que la de los muones cósmicos.

En consecuencia, para aumentar la capacidad de rechazo del experimento a señales debidas a este fondo, un requisito imprescindible es aumentar la probabilidad de detección de los neutrones cósmicos. Para ello, es fundamental el diseño de sistemas de vetos más complejos que incorporen capas de materiales que maximicen la sección eficaz de captura neutrónica, como el gadolinio o el cadmio. La operación de un dispositivo dedicado a la detección de neutrones cósmicos permitirá conocer y monitorizar el flujo real de estas partículas. De esta forma, se podrá estimar con mayor precisión la eficiencia del sistema de vetos actual. Por otro lado, más allá del ámbito de la investigación, conocer el flujo de neutrones cósmicos es a su vez importante en contextos como el de la microelectrónica, ya que estas partículas son las principales responsables de los efectos que la radiación cósmica ocasiona en aparatos electrónicos.

Los neutrones cósmicos alcanzan la Tierra en un rango de energías característico que comienza en 10 MeV y se extiende más allá de los 10 GeV, y en un flujo poco intenso. Además de estas restricciones, la detección de neutrones cósmicos se ve dificultada por la inherente presencia de un fondo de radiación gamma. Este fondo electromagnético debe ser bloqueado o minimizado para evitar su interferencia con las señales de interés. El grupo consultó la posible oferta de detectores de neutrones cósmicos en el mercado, que resultaron ser poco eficientes y muy costosos. La tecnología ofrecida comercialmente resultaba atractiva para neutrones rápidos, $\sim (200 \text{ keV}-10 \text{ MeV})$, y altos flujos. No obstante, se mostraba totalmente ineficiente en la detección de neutrones cósmicos, ya que no se adaptaba a las condiciones de medida. Por lo tanto, se apostó por el diseño y la fabricación propia y desde cero de un detector de neutrones cósmicos. Es precisamente en este contexto en el que se enmarca este Trabajo Fin de Máster.

En este trabajo se va a llevar a cabo el diseño de un detector de neutrones cósmicos basado en helio natural empleando técnicas de simulación. Tomando como referencia un modelo comercial, se efectúa un ejercicio de adaptación del mismo a un detector gaseoso con planos de lectura pixelizados, tecnología en la que el grupo de investigación tiene una vasta experiencia. Con el objetivo de ser sensibles al rango de altas energías, y avalados por las secciones eficaces, un requisito imprescindible es concebir un sistema de blindaje para este detector que maximice el proceso de detección neutrónica. Bajo esta pretensión, por un lado, se agregará al esquema del detector un material mo-

derador, en concreto, polietileno, encargado de ralentizar los neutrones altamente energéticos al rango de energías donde el helio exhibe la máxima probabilidad de interacción. Por otro lado, a fin de bloquear la presencia de un fondo de radiación gamma y de optimizar la generación de productos secundarios, se incorporará plomo al conjunto. Determinar el grosor y la disposición de la estructura del blindaje constituirá el grueso del trabajo. Partiendo de configuraciones básicas que incorporan únicamente láminas, se llegará paulatinamente a un diseño más maduro y fácilmente mecanizable que resuelve las limitaciones de esquemas preliminares. Las prestaciones que exhibe el dispositivo satisfacen los requerimientos del grupo en cuanto a estadística de neutrones e interferencia del fondo gamma.

Las conclusiones derivadas de este trabajo tendrán una consecuencia directa en los planes formales del grupo de investigación, ya que se tiene previsto en un futuro próximo la construcción y operación de este dispositivo para mermar la contribución de neutrones cósmicos al nivel de fondo radiactivo. Con este propósito, el detector final se podría utilizar en DESY (Alemania), emplazamiento del proyecto IAXO, para aumentar la capacidad de rechazo del experimento a señales debidas a este fondo. Además, con este detector es posible recabar un gran volumen de información sobre el flujo de gammas cósmicas que alcanza el experimento, si éste se opera sin blindaje. Este dato es de interés aunque estas partículas vayan a blindarse específicamente en IAXO y BabyIA XO.

Este Trabajo Fin de Máster está dividido en cinco apartados principales. En primer lugar, en el Capítulo 2, se analizan los neutrones cósmicos y sus modos de interacción con el objetivo de mejorar el entendimiento de las reacciones que involucran los neutrones de alta energía. A su vez, se exponen brevemente los tipos de detectores de neutrones, y se lleva a cabo un estudio de secciones eficaces que verifica el potencial del helio natural como medio de detección de neutrones rápidos. A continuación, en el Capítulo 3 se describen las herramientas de simulación empleadas en el trabajo, y se presentan los resultados más importantes de simulaciones previas. Este ejercicio preliminar comprende desde configuraciones básicas paralelepípedas que incluyen una sola lámina, hasta diseños más exóticos que involucran un blindaje completo para controlar la radiación que penetra lateralmente en el detector. Los detalles técnicos de estas simulaciones se especifican en anexos. Posteriormente, el Capítulo 4 se encarga de presentar el diseño final del detector desde un punto de vista técnico y de simulación, mostrando la implementación de la geometría en el software. A continuación, tiene lugar la caracterización de observables y la aplicación de criterios de selección. Seguidamente, se revelan las prestaciones del dispositivo en cuanto a conteo de neutrones y presencia de gammas. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones extraídas del trabajo, y se proponen una serie de mejoras al diseño del detector que en el futuro resultarán en una mayor eficiencia del dispositivo frente a neutrones cósmicos.

Capítulo 2

Neutrones cósmicos

Los rayos cósmicos son partículas cargadas de muy alta energía y origen extraterrestre que se propagan a una velocidad cercana a la velocidad de la luz y bombardean continuamente la Tierra. Las energías manejadas por estas partículas abarcan desde unos pocos MeV hasta más de 10^{20} eV esto es, ~ 8 órdenes de magnitud por encima de las energías alcanzables hoy en día en los aceleradores de partículas más potentes. En su recorrido, los rayos cósmicos primarios interactúan con la atmósfera terrestre mediante fragmentación de los núcleos de gas generando una cascada de partículas de menor energía, los denominados rayos cósmicos secundarios, que puede dividirse en tres componentes principales. Por un lado, se distingue la componente mesónica, compuesta por piones y kaones. Por otro lado, se encuentra la componente electromagnética, integrada por fotones, electrones y positrones. Por último, la componente nucleónica la conforman protones y neutrones.

De esta forma, los neutrones cósmicos son partículas de radiación cósmica secundaria que en su llegada a la Tierra pueden interactuar con los materiales que encuentran a su paso. Dependiendo del rango de energías y del flujo de partículas estimado, y a fin de facilitar su modelización, se ha distinguido entre neutrones cósmicos de baja y alta energía. Los neutrones cósmicos de baja energía presentan energías características entre 10 y 1000 MeV, y un flujo de $83,5 \text{ n}/(\text{m}^2 \text{ s})$. Por su parte, los neutrones cósmicos de alta energía comprenden energías entre 1 y 10 GeV, y su flujo desciende a $0,1 \text{ n}/(\text{m}^2 \text{ s})$ [11].

Las principales interacciones de los neutrones con la materia son:

- Dispersión elástica (n,n): el neutrón cede parte de su energía al núcleo atómico, el cual retrocede e ioniza el medio a su paso.
- Dispersión inelástica (n,n'): el neutrón sale dispersado, y parte de la energía perdida por éste en la colisión se invierte en excitar al núcleo. El núcleo puede regresar a su estado fundamental emitiendo uno o varios fotones y, en menor medida, electrones de conversión interna.
- Absorción: se trata de reacciones nucleares en las que el neutrón es absorbido por el núcleo atómico. El núcleo compuesto reacciona a la captura mediante la emisión de radiación gamma (n, γ), de partículas cargadas (n,p), (n, α), (n,d), o de neutrones (n,2n), (n,3n), ...

En general, los neutrones cósmicos de menor energía interactúan fundamentalmente mediante procesos elásticos. Este es precisamente el mecanismo que se va a utilizar en el trabajo para su moderación en el blindaje y su posterior detección. A energías más altas, tienen lugar una serie de procesos inelásticos o de ruptura que producen partículas secundarias (gammas o neutrones secundarios, entre otras) que pueden interactuar de nuevo. Más allá de estas reacciones estandarizadas, en el rango de altas energías tienen lugar reacciones más exóticas características de fuentes

de espalación que involucran más productos, tales como (n,np) , $(n,n\alpha)$, $(n,2p)$ o (n,npd) .

El estudio de los neutrones cósmicos constituye una materia de enorme interés. A nivel de investigación en ciencia fundamental, conocer estos neutrones es importante no sólo para disminuir el nivel de fondo de experimentos realizados en superficie, sino también para determinar la contaminación ambiental de estas partículas. Entre los principales nichos de mercado donde este conocimiento tiene una aplicación directa, se encuentra la seguridad de sistemas electrónicos de telecomunicaciones y de navegación. En este ámbito, los neutrones cósmicos son las partículas responsables de la mayor parte de errores transitorios hallados en circuitos integrados. Además, afectan al transporte y almacenamiento de energía eléctrica, a la dosis efectiva recibida por las tripulaciones aéreas, o a la operación y explotación de reactores nucleares.

A pesar de la envergadura de estas aplicaciones, relativamente poco esfuerzo tecnológico se ha direccionado hasta la fecha hacia el estudio de los neutrones cósmicos. La mayor parte de detectores comerciales disponibles en el mercado son sensibles a neutrones procedentes de la radioactividad ambiental, de unos pocos MeV y grandes flujos. Sin embargo, estos dispositivos son poco eficientes para detectar neutrones provenientes de rayos cósmicos, de gran energía y menor flujo.

2.1. Detectores de neutrones

La detección de neutrones es una técnica con una gran variedad de aplicaciones entre las que se incluyen no sólo la investigación científica, sino también la física médica o la seguridad nuclear. La ausencia de carga eléctrica neta de esta partícula conlleva que su detección esté basada en métodos indirectos que implican la interacción del neutrón con un núcleo y la posterior liberación de partículas secundarias cargadas que ionizan el medio y pueden ser detectadas. Los detectores de neutrones, además de propiedades generales comunes a cualquier detector activo de radiación (tiempo muerto mínimo, alta resolución en energía, o elevada sensibilidad y eficiencia), deben atender a una variable adicional derivada del hecho de que estos dispositivos operan en campos mixtos neutrón-gamma [12]. De esta forma, se debe prestar especial atención al criterio de rechazo a gammas en presencia de neutrones para evitar que la radiación electromagnética induzca señales falsas.

Se distinguen tres tipos de detectores de neutrones: gaseosos, centelladores y semiconductores. Cabe mencionar que ninguno de estos dispositivos está optimizado para la detección de neutrones cósmicos. De esta forma, tal y como se recoge en este trabajo, si se pretende destinarlos a dicha tarea resulta imprescindible llevar a cabo un ejercicio previo de adaptación de los mismos para aumentar su sensibilidad en el rango de altas energías.

En primer lugar, los detectores gaseosos consisten en un volumen de gas entre dos electrodos a los que se aplica una diferencia de potencial. En este contexto, los contadores proporcionales basados en ^3He destacan notoriamente en la detección de neutrones térmicos. Se trata de detectores con una alta estabilidad y eficiencia, y una sensibilidad a rayos gamma prácticamente despreciable al estar basados en reacciones de captura de neutrones (n,p) . El amplio uso del ^3He en sectores esenciales provoca una situación de desabastecimiento que exige buscar alternativas más accesibles. Los contadores de BF_3 , las cámaras con revestimiento de ^{10}B o las cámaras de fisión constituyen una tecnología alternativa. Basados en la reacción (n,α) , su sensibilidad a gammas es baja y comparable a la de tubos de ^3He . Sin embargo, su baja eficiencia limita a día de hoy su expansión.

Por otra parte, se encuentran los detectores basados en la detección de la ionización causada por núcleos en retroceso originados en la colisión elástica de un neutrón con un gas. La energía máxima transferida por el neutrón a un núcleo en retroceso viene dada por:

$$E_{R,m\acute{a}x} = \frac{4A}{(1+A)^2} E_n, \quad (2.1)$$

donde A es el número msico del medio de detección, y E_n es la energía del neutrón incidente.

La Ecuación 2.1 revela que la transferencia de energía por parte del neutrón incidente es mayor para núcleos ligeros. De hecho, en muchas aplicaciones relativas a la detección de neutrones rápidos suele utilizarse como gas detector hidrógeno (puro o en forma de hidrocarburos, como el metano y el propano). No obstante, en algunas prácticas [13], tales como la que ocupan este trabajo, se selecciona como gas detector helio natural. En este medio, el neutrón incidente transfiere hasta un máximo del 64 % de su energía al núcleo en retroceso. De esta forma, el empleo de este gas resulta apropiado en aquellas aplicaciones en las que interesa maximizar las colisiones elásticas y la energía depositada en cada choque. La sensibilidad a neutrones del helio natural es comparable a la del ^3He . Además, es significativamente más accesible.

Una desventaja primordial de los detectores gaseosos es su baja eficiencia, ya que, en general, el rango de las partículas cargadas es grande comparado con su volumen sensible. Los detectores sólidos cuentan con densidades más altas que reportan probabilidades de absorción razonables en tamaños compactos. En este ámbito, los detectores de centelleo, basados en el acoplo óptico de un material centelleador a un tubo fotomultiplicador, ofrecen un método rápido y versátil para la detección de neutrones lentos y rápidos. Además, los detectores basados en semiconductores, compuestos típicamente por un diodo de silicio o germanio tipo P-N polarizado en inversa que origina pares electrón-hueco, se presentan como una alternativa a las tradicionales cámaras de ionización.

En este trabajo, se va a disenar un detector de neutrones cósmicos basado en el helio natural haciendo uso de detectores Micromegas (*Micromesh Gas Structures*), un tipo de detectores gaseosos que utilizan planos de lectura pixelizados en los que el grupo dispone de gran experiencia. Esta tecnología permite reconstruir la topología de los eventos con gran estabilidad, ganancia y homogeneidad espacial, lo cual facilita la identificación de patrones en la labor de discriminación.

El método de detección varía en función del modo de interacción del neutrón, el cual está restringido por la dependencia de la sección eficaz del material con la energía del neutrón incidente.

2.2. Estudio de secciones eficaces

El observable más importante a considerar en el diseno de un detector de radiación es el de sección eficaz, que desde el punto de vista fenomenológico representa la probabilidad de ocurrencia de una determinada reacción. Como se ha comentado, en este trabajo se va a utilizar como medio de detección el helio natural. En la Figura 2.1, se establece una comparación entre la sección eficaz elástica y de captura del ^3He y la sección eficaz elástica del ^4He .

Se comprueba que el ^3He posee una alta sección eficaz de captura (n,p) para neutrones de baja energía. Esto avala su preponderancia en la detección de neutrones térmicos. La sección eficaz elástica del ^3He presenta un comportamiento similar al del ^4He , aunque en una magnitud prácticamente un orden superior. Una excepción a esta conducta se exhibe en torno al MeV. Cuestiones relacionadas con el precio y la escasez de este elemento propician que este gas no se considere como medio de detección del detector disenado en este trabajo.

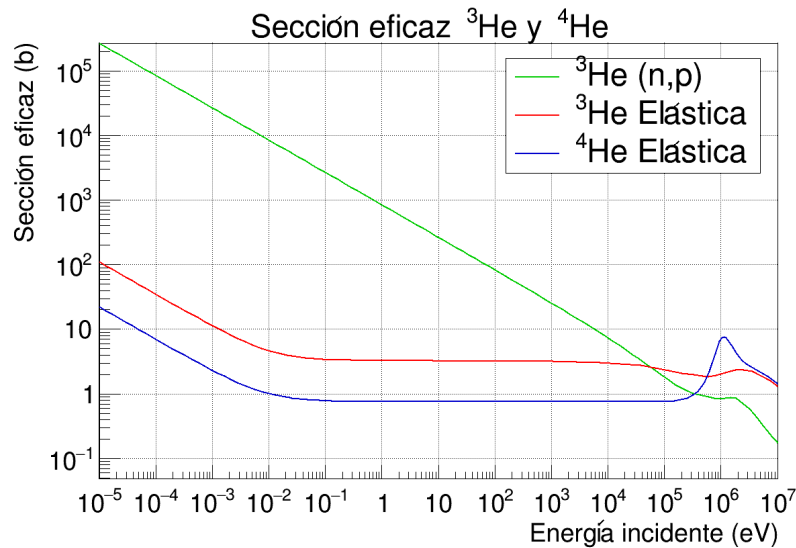


Figura 2.1: Sección eficaz elástica y de captura del ^3He , y sección eficaz elástica del ^4He [14].

La sección eficaz elástica del ^4He , que coincide con la sección eficaz total, es ~ 4 órdenes de magnitud inferior a la sección eficaz de captura del ^3He en la región de bajas energías. Por tanto, la detección de neutrones lentos no se contempla en este medio. Llama la atención el pico en torno a 1 MeV que alcanza prácticamente la decena de barns, llegando a superar la sección eficaz elástica del ^3He . Esta singularidad acredita el potencial del helio natural para la detección de neutrones rápidos. Además, la sección eficaz elástica del ^4He adquiere un valor relativamente elevado en torno al meV. Entre la zona de bajas energías y el pico característico alrededor del MeV, la sección eficaz del ^4He exhibe un comportamiento sumamente plano. En consecuencia, se van a desarrollar estrategias encaminadas a aumentar la probabilidad de interacción de los neutrones con el helio natural en estas regiones. Para ello, hay que tener en cuenta que las limitaciones que caracterizan la detección de neutrones cósmicos son la baja estadística y la inherente presencia de un fondo de radiación gamma. Para paliar estos déficits, el detector puede incorporar sistemas adicionales a su diseño.

Por un lado, una estrategia para solventar la escasa eficiencia es agregar materiales moderadores al esquema del detector. La moderación de neutrones es el proceso de reducción de la energía cinética de un neutrón mediante una serie de colisiones, principalmente elásticas, con núcleos dispersores hasta que la velocidad del neutrón alcanza el rango de energías térmicas. Las propiedades que caracterizan un buen moderador (sección eficaz de dispersión elástica y de captura elevada y pequeña respectivamente, alta letargia o baja activación neutrónica) se reúnen en materiales de número atómico pequeño, siendo los más extendidos los hidrogenados. En este trabajo, con el objetivo de ralentizar los neutrones, o bien hasta el meV, o bien hasta la región en torno al MeV, es decir, hasta aquellas zonas donde la sección eficaz elástica del helio natural exhibe su máximo, se va a utilizar como material moderador polietileno (PE).

Por otro lado, el segundo criterio se vincula con bloquear, o minimizar, la presencia de radiación gamma. Su origen se vincula no sólo a fuentes cósmicas, sino también a la radiactividad intrínseca, a la activación cosmogénica de los componentes del montaje, o a las reacciones inelásticas y de captura que tienen lugar en el mismo. Estas gammas interactúan con el conjunto y crean electrones secundarios que ionizan el gas pudiendo distorsionar el conteo de neutrones. Una forma de minimizar esta interferencia es incorporar como blindaje materiales de número atómico alto y densidad elevada, como el plomo. De forma simultánea a la atenuación del fondo electromagnético, estos materiales se encuentran en estrecha relación con la generación de partículas secundarias. Estos productos secundarios son principalmente partículas cargadas (electrones y protones) y, en

menor medida, fotones y neutrones secundarios, estos últimos de energías intrínsecamente menores a la del neutrón incidente. Estas partículas proporcionan una segunda población de eventos que ayuda a incrementar la eficiencia del detector. Al aumentar el espesor de plomo, tienen lugar un mayor número de procesos de dispersión inelástica o de multiplicación de neutrones responsables de esta fenomenología.

Acero y aluminio se perfilan como potenciales candidatos a constituir la pared o vasija del detector. En el Anexo A se revisan exhaustivamente las secciones eficaces de los principales materiales involucrados en el diseño del detector: acero, aluminio, polietileno y plomo. En términos de neutrones, las interacciones que van a dominar son las dispersiones elásticas en helio y en PE, y el scattering inelástico y el de multiplicación de neutrones en aluminio, acero y plomo. Este último canal es el que interesa explotar para maximizar la producción de secundarios. Respecto al mecanismo de interacción de gammas, la creación de pares se ve claramente favorecida a muy altas energías [16]. Los valores que adquiere el recorrido libre medio de neutrones y gammas en estos materiales invitan a postular una estimación de los espesores que se van a ver involucrados en el detector. Mientras que para la moderación de neutrones va a ser necesaria simular la respuesta del dispositivo al incorporar hasta 10 cm de PE, para la eliminación de una fracción considerable del fondo electromagnético y la producción asociada de secundarios, se consideran grosores de hasta 5 cm de plomo.

Capítulo 3

Simulaciones

3.1. Herramientas y metodología

En los últimos treinta años, la técnica de simulación se ha convertido, junto con los estudios teóricos y la experimentación, en uno de los tres pilares fundamentales sobre los que se apoya la investigación moderna en Física de Partículas. El empleo de códigos Monte Carlo de transporte de radiación constituye una herramienta esencial no sólo en la concreción del diseño final de experimentos, sino también en la elaboración de técnicas de discriminación en análisis a posteriori.

Para la realización de las simulaciones recogidas en este trabajo se ha hecho uso de REST-for-Physics (*Software for Rare Event Searches with TPCs*), un software colaborativo creado y desarrollado en la Universidad de Zaragoza ante la necesidad de disponer de un formato común para la adquisición, almacenaje, simulación y procesamiento de los datos en detectores TPCs.¹ Esta estrategia permite aumentar la coherencia entre simulación y experimento. REST está integrado en ROOT [17], un *framework* orientado a objetos desarrollado en el CERN para el análisis de datos avanzado a gran escala. Se trata de un software libre de código abierto implementado principalmente en C++ que almacena los datos jerárquicamente en una estructura de árbol para optimizar los recursos de memoria y el acceso en paralelo a la información.

REST permite efectuar simulaciones haciendo uso de GEANT4 (*GEometry ANd Tracking 4*) mediante el módulo RestG4. GEANT4 [18] es un software libre implementado en C++ que simula el paso de las partículas a lo largo de la materia en un amplio rango de energía (250 eV-TeV). Esta herramienta, a su vez extendida en campos como la física médica o la ingeniería aeroespacial, permite simular, en base a distintos modelos de interacciones nucleares o electromagnéticas, los eventos primarios, sus trayectorias y los procesos de interacción con el medio detector. A continuación, GEANT4 almacena la información siguiendo la jerarquía de *evento*, *hit* y *traza*.

- Una simulación se divide en eventos independientes correspondientes a un suceso primario.
- Un hit es un depósito puntual de energía definido a partir de sus coordenadas espacio-temporales, su energía y el tipo de proceso físico que acontece.
- Una traza es un grupo de hits que se encuentran próximos según una distancia fijada por el usuario. En este trabajo se estipula que para pertenecer a la misma traza la distancia entre hits debe ser menor de 1 cm.

La arquitectura de REST incorpora a su vez códigos externos adicionales como MAGBOLTZ / GARFIELD y GARFIELD ++, programas de cálculo de propiedades del transporte de electrones en

¹Las Cámaras de Proyección Temporal (TPCs) son un tipo de detectores gaseosos capaz de recuperar información tridimensional de la distribución de carga original considerando la información temporal de la cámara de deriva.

gases. Además, REST implementa los efectos de respuesta del detector: amplificación de la carga, pixelización y producción de señal en el plano de lectura.

En un archivo *.rml* se especifican los parámetros de la simulación: número y tipo de evento primario, distribución angular y de energía o volumen sensible, entre otros. El volumen sensible, en este trabajo el gas interior del detector, es aquel que impone la condición de que para registrar un evento debe haber, al menos, un depósito de energía en el mismo. El resto de volúmenes activos en la geometría registran únicamente información de los sucesos que han depositado energía en el volumen sensible, lo cual corresponde a un pequeño porcentaje de todos los eventos simulados. Desde este punto de vista, las simulaciones serán muy costosas computacionalmente.

Para considerar la física del detector, es preciso definir un *readout*, o plano de lectura, que emula la funcionalidad de una Micromegas. De esta forma, tal y como sucede experimentalmente, tras el procesamiento de datos sólo queda información de aquellos sucesos que han dejado señal sobre el plano de lectura. Para poder aplicar cortes espaciales, se define un volumen fiducial como aquel prisma que tiene como base el plano de lectura del detector y está situado dentro del gas. El paquete RestG4 se ejecuta, y almacena las trazas de los depósitos de energía en el gas en un archivo *.root*. La aplicación *restManager* de REST analiza dicho archivo y crea otro de análisis con los observables de interés: energía depositada en el gas, número de trazas, distribución del hit en el plano XY o distancia a la pared del prisma fiducial (d_w). Entre los observables analizados en este trabajo, este último podría constituir el principal criterio de discriminación entre neutrones y gammas.

Las simulaciones realizadas en este Trabajo Fin de Máster están encaminadas al diseño de un detector de neutrones cósmicos. Para obtener una definición formal del mismo, se propone realizar simulaciones de neutrones y gammas cósmicos. El objetivo es analizar cómo se modifica la respuesta del detector al añadir a su esquema estructuras adicionales que satisfacen las propiedades de moderación y blindaje descritas en el capítulo anterior. De esta forma, partiendo de configuraciones básicas que incorporan únicamente láminas de plomo y de PE de un cierto espesor, se llegará paulatinamente a un diseño que involucra un blindaje no sólo vertical, sino también lateral.

Los parámetros clave a considerar en esta memoria son la eficiencia absoluta del detector frente a neutrones (ϵ_n) y frente a gammas (ϵ_γ), magnitud que se define como el cociente entre los sucesos registrados y los eventos iniciales lanzados en las simulaciones, y el porcentaje absoluto de rechazo gamma en presencia de neutrones (GARRn), del inglés *Gamma Absolute Rejection Ratio for neutrons*, que mide la respuesta del detector en la presencia tanto de fuentes de neutrones como de gammas. Este parámetro se define como el cociente entre la eficiencia absoluta del dispositivo frente a gammas y frente a neutrones [19]. En consecuencia, cuanto menor sea el GARRn, menos sensible será el conjunto a gammas. Cabe mencionar que en este trabajo no va a interesar aplicar métodos de discriminación que rechacen un gran número de neutrones, aunque con ello se aumente el factor de rechazo a gammas. En cambio, se debe favorecer aumentar la estadística y conocer con precisión el porcentaje de sucesos correspondientes a neutrones que alcanzan el detector.

El proceso de análisis exige obtener magnitudes por unidad de tiempo normalizando los resultados por el valor del flujo de los productos cósmicos secundarios. Sin embargo, la naturaleza estocástica del proceso de propagación de la cascada de rayos cósmicos a través de la atmósfera propicia que la estimación de este parámetro en un punto no esté exento de incertidumbre. En general, la distribución de secundarios depende de la energía de la partícula y de su ángulo de incidencia, siendo más probables energías bajas y trayectorias verticales. En las simulaciones realizadas, las distribuciones angulares y de energía son independientes. Por un lado, la distribución angular a nivel de superficie es función del ángulo cenital de acuerdo a una ley $\sim \cos^2(\theta)$ respecto a la vertical. Por otro

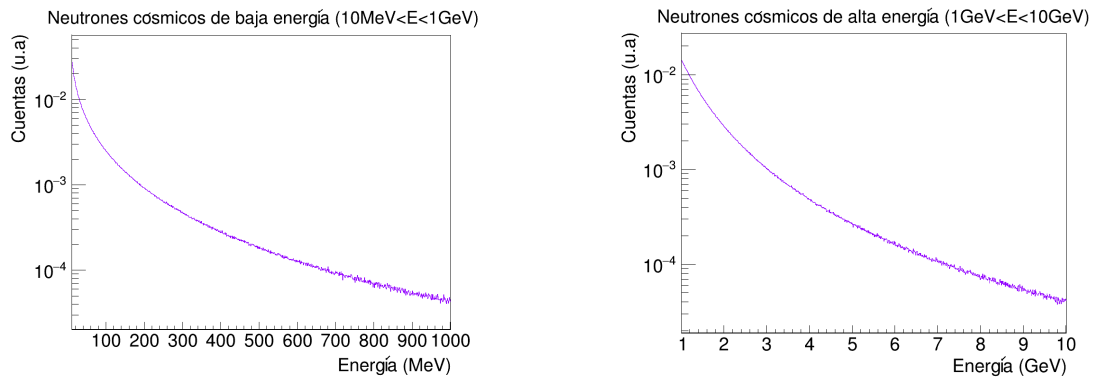


Figura 3.1 Distribución de energía de neutrones cósmicos de baja y alta energía a nivel del mar [11].

lado, tal y como recogen las Figuras 3.1 y 3.2, la distribución de energía a nivel del mar sigue una ley de potencias. Las simulaciones utilizan como sucesos primarios neutrones y gammas cósmicos de acuerdo a estas distribuciones. En la Tabla 3.1, se muestran los valores de flujo extraídos de la literatura. Las simulaciones comienzan emitiendo las partículas de manera uniforme y con una distribución $\cos^2(\theta)$ desde un plano que puede considerarse infinito sobre el detector.

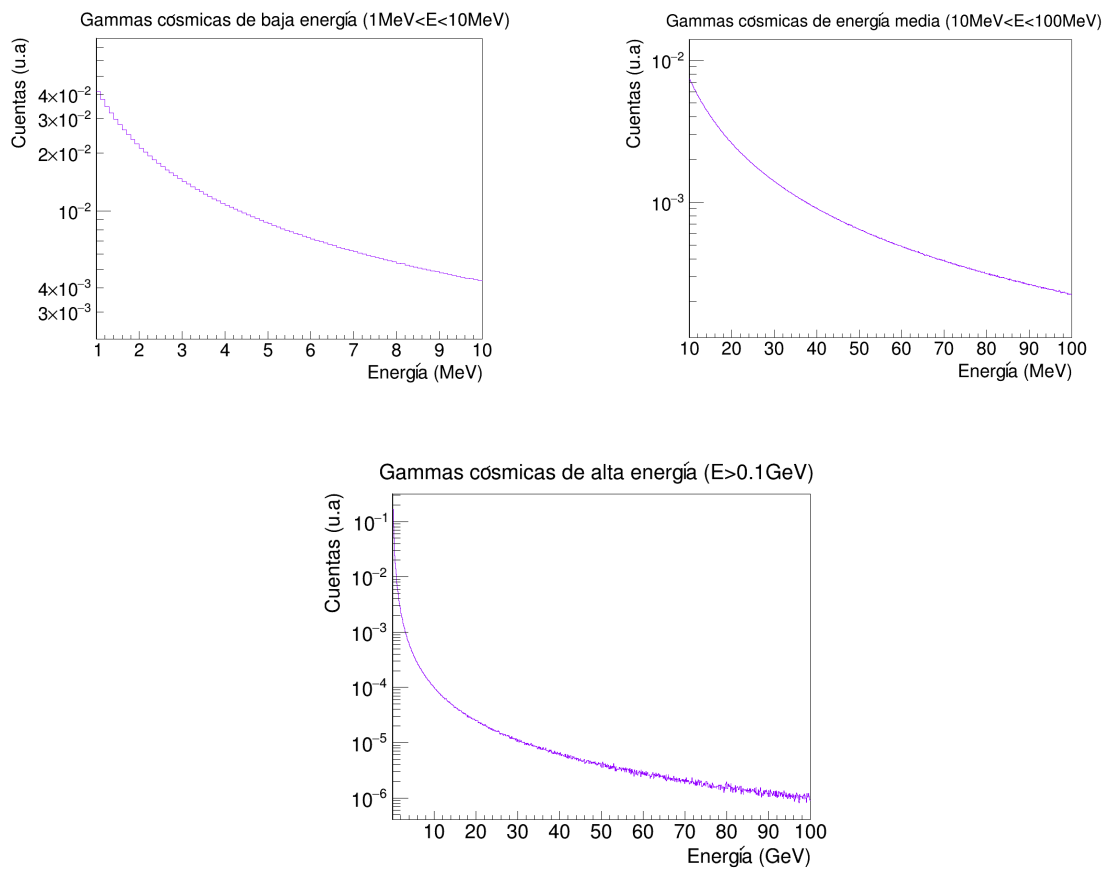


Figura 3.2: Distribución de energía de gammas cósmicos de baja, media y alta energía a nivel del mar [20].

Partícula	Rango de energía	Energía media (MeV)	Flujo (cuentas/(m ² s))
Neutrones cósmicos de baja energía (LE)	[10,1000] MeV	2099	83,5
Neutrones cósmicos de alta energía (HE)	[1,10] GeV	117	0.1
Gammas cósmicas de baja energía (LE)	[1,10] MeV	3,909	440
Gammas cósmicas de energía media (ME)	[10,100] MeV	31,35	40
Gammas cósmicas de alta energía (HE)	>1 GeV	691,5	30

Tabla 3.1: Parámetros de las distribuciones de energía de neutrones y gammas cósmicos [11, 20].

3.2. Simulaciones previas

Como antesala al diseño final del detector, en este trabajo se han llevado a cabo una serie de estudios previos que han servido para guiar y conformar gradualmente una línea de trabajo. A continuación, se procede a enunciar los resultados más importantes de este ejercicio preliminar.

El dispositivo *Combined Fast and Thermal Neutron Detector* de la compañía Arktis constituye una alternativa ofrecida al grupo para la detección de neutrones cósmicos. En sus hojas de especificaciones, el fabricante asegura una sensibilidad a neutrones de 0,12 n/(s · ng de ²⁵²Cf a 2 m). Sin embargo, no especifica la dirección en que se posiciona la fuente, ni la presión de operación. Resulta imprescindible conocer este último parámetro para poder tomar como referencia este dispositivo en el proceso de diseño. En consecuencia, para obtener esta información se lleva a cabo la simulación de la calibración de un detector definido *ad-hoc* con mismo volumen sensible que el comercial. Con ello, se verifica que el dispositivo se posiciona verticalmente a la fuente de ²⁵²Cf a 2 m de distancia de la misma, y que opera a 25 bar.

A continuación, se propone un prototipo con misma masa de helio que el detector comercial justamente descrito (11,95 g a 25 bar) a presión atmosférica basado en una geometría paralelepípeda de 50×50×40 cm³ con pared de aluminio, acero o PE. Con este dispositivo se pretende analizar la respuesta del detector al integrar láminas en su diseño. Por un lado, las simulaciones revelan que la lámina de PE mejora la eficiencia a neutrones en un factor 30-40 % menor que la de plomo, y que la detección neutrónica se optimiza si la lámina se coloca delante de la cámara. Por otro lado, se evidencia que el espesor óptimo de la lámina de plomo se sitúa entre 3 y 5 cm, y que la pared de acero se ve favorecida sobre las otras opciones de aluminio o PE en términos de detección neutrónica. Sin embargo, en estas simulaciones el porcentaje de neutrones detectados apenas alcanza el 10 %.

Para mejorar la estadística, es preciso concebir diseños más complejos que incorporen láminas superpuestas de plomo y de PE de un espesor variable entre 25 y 50 mm delante o detrás de la cámara. Dicha geometría se representa en la Figura 3.3. Los detalles de las simulaciones se recogen en el Anexo B.1. Analizando los resultados ahí expuestos, se verifica que la configuración que se ven favorecidas atendiendo a criterios de porcentaje de neutrones detectados y de GARRn son (las estructuras se nombran partiendo del gas y desplazándose hacia afuera):

- Pared Acero 2 mm + lámina de PE 25 mm + lámina de plomo 50 mm, ambas láminas delante.
- Pared Acero 2 mm+ lámina de PE 50 mm + lámina de plomo 25 mm, ambas láminas delante.
- Pared Acero 2 mm + lámina de PE 50 mm + lámina de plomo 50 mm, ambas láminas delante.

La estadística de neutrones obtenida en la simulación de estas configuraciones se sitúa todavía por debajo de los valores requeridos. Es decir, la eficiencia del detector frente a neutrones sigue siendo relativamente baja. Hasta ahora, colocando láminas delante del detector se ha conseguido

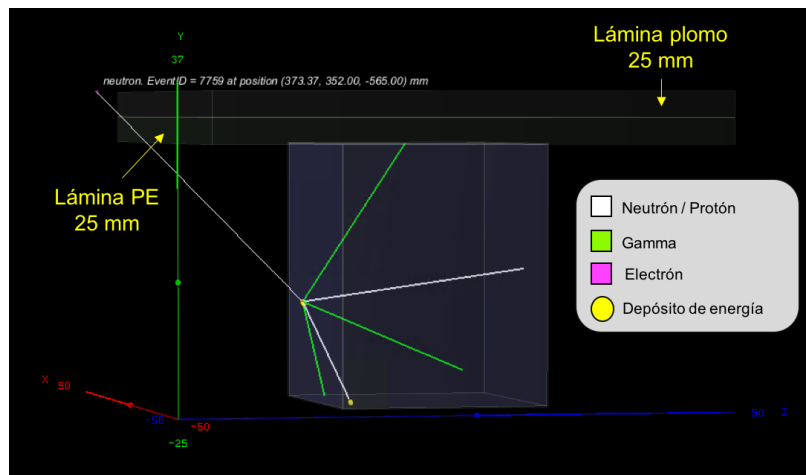


Figura 3.3: Configuración preliminar analizada en la etapa intermedia del diseño del detector de neutrones cósmicos. Del centro del conjunto hacia afuera, se distingue una pared de acero de 2 mm, una lámina de PE de 25 mm, y una lámina de plomo de 25 mm.

blindar la trayectoria vertical de neutrones y gammas. No obstante, aquellas partículas que salen de la pared generadora bajo un determinado ángulo, pueden alcanzar el medio de detección sin ninguna interferencia, tal y como se ilustra en la Figura 3.3.

En consecuencia, el último bloque de simulaciones previas se orienta a bloquear la radiación gamma que incide lateralmente, maximizando paralelamente el número de neutrones detectados. Basándose en el blindaje pasivo de los detectores de CAST (*CERN Axion Solar Telescope*) y de IAXO-D0, prototipo del detector de IAXO que actualmente se encuentra en funcionamiento en Zaragoza, se decide examinar configuraciones análogas donde el blindaje de plomo proporcione una cobertura total en $\sim 4\pi$. De esta forma, es posible asegurar la absorción de la radiación gamma ambiental y de una fracción considerable de la de origen cósmico que penetra en el detector lateralmente. Para especificaciones de las simulaciones, se recomienda consultar el Anexo B.2.

La geometría simulada se exhibe en la Figura 3.4. Tal y como se observa, el detector se sitúa en el centro de un blindaje de plomo completo de 50 mm. A partir de esta estructura básica, se incorporan al diseño del detector láminas de plomo de 25 mm y láminas de PE de 25 y 50 mm. Tras este análisis, las geometrías más competitivas son las siguientes (las estructuras, de nuevo, se nombran partiendo del gas y desplazándose hacia afuera):

- Pared Acero 2 mm + blindaje completo 50 mm + lámina plomo 25 mm + lámina PE 50 mm, ambas láminas delante.
- Pared Acero 2 mm + blindaje completo 50 mm + lámina PE 50 mm + lámina plomo 25 mm, ambas láminas delante.

Se comprueba que incorporar láminas por encima del blindaje completo de plomo es muy recomendable, especialmente en términos del fondo gamma, ya que la contribución del mismo sin filtrar se ve reducido en torno a un 70 %. Por su parte, la estadística de neutrones se ve aumentada en un factor ~ 2 . Todo ello constituye una evidencia clara de que el diseño del detector debe constar de varias capas de blindaje completo, cada una desempeñando un papel muy concreto.

A la luz de los resultados, es posible finalmente esbozar una primera aproximación del diseño del detector de neutrones cósmicos.

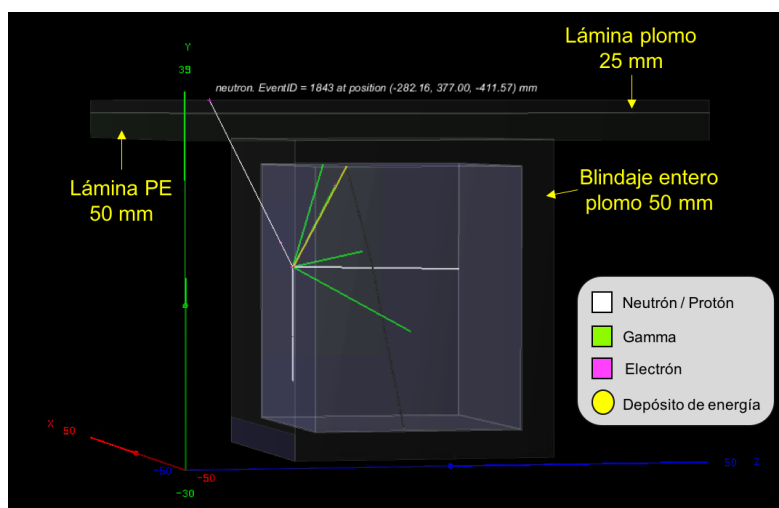


Figura 3.4: Configuración preliminar estudiada en el último paso previo a la concreción del diseño del detector de neutrones cósmicos. Del centro del conjunto hacia afuera, se distingue una pared de acero de 2 mm, un blindaje completo de plomo de 50 mm, una lámina de PE de 50 mm y una lámina de plomo de 25 mm.

El esquema del conjunto debe disponer de varias capas de blindaje rodeando por completo al detector para controlar la radiación lateral. El tipo de material y el orden óptimo, comenzando desde el exterior hacia el centro del montaje, es el siguiente: un cierto espesor de plomo, un grosor de PE, y, finalmente, otro de plomo. Con este diseño en capas, los neutrones cósmicos iniciales alcanzan la primera capa de plomo y experimentan típicamente procesos inelásticos y de multiplicación que dan lugar a neutrones secundarios de menor energía. Éstos penetran en el espesor de PE y se moderan, o bien hasta el meV, o bien hasta la región en torno al MeV, regiones donde la probabilidad de interacción con el helio es máxima. A continuación, estas partículas acceden al segundo revestimiento de plomo y, análogamente, generan productos secundarios que depositan su energía en el gas. De esta forma, los neutrones, o bien interaccionan con la primera capa de plomo, o bien con la segunda. Respecto a las gammas cósmicas primarias, los productos de estas partículas pueden verse asimilados en el primer revestimiento de plomo, o atravesar el PE sin prácticamente interferencia hasta ingresar en la segunda envoltura de este metal pesado, donde acabarán absorbiéndose.

Con el objetivo de fijar definitivamente el espesor de la pared y de cada capa de blindaje, y discutir cuestiones prácticas relacionadas con materiales, disponibilidades y factibilidades, se decide contactar con el área de ingeniería ².

²Agradecer a J.Castel su disposición y colaboración en el trabajo.

Capítulo 4

Diseño del detector

4.1. Descripción del diseño

Las simulaciones previas realizadas han servido para entender en profundidad el proceso de interacción de los neutrones y gammas cósmicos y de sus productos con cada una de las estructuras que conforman el detector, así como para acumular una serie de directrices en el proceso de diseño. Una vez consideradas todas estas pautas, es preciso ratificar cuán realista es la configuración cúbica planteada atendiendo a consideraciones ingenieriles y económicas, ya que los resultados arrojados por este Trabajo Fin de Máster pretenden aplicarse en la construcción y operación del detector por parte del grupo en un futuro no muy lejano.

El principal inconveniente de una geometría rectangular es la concentración de tensiones que tiene lugar en los puntos de unión de cada una de las piezas que conforman la configuración. Las simulaciones preliminares descritas en el capítulo anterior postularon que la pared favorecida por las simulaciones era aquella de 2 mm de acero. Sin embargo, siguiendo la normativa ISO de cálculos de vasijas, un espesor razonable para una cámara de acero rectangular se sitúa en torno a 24 mm [21].

En una geometría cilíndrica (o esférica), los cálculos de tensiones se simplifican en gran medida al eliminar los momentos asociados a las uniones. En general, un cilindro es una estructura más estable mecánicamente. Al aplicar en este sistema una presión de 4 bar, la concentración de tensiones es superficial y en una magnitud claramente inferior a la de la geometría rectangular, por lo que la deformación de la vasija es sustancialmente menor. En consecuencia, el espesor de la pared de acero y aluminio requerido en una geometría cilíndrica se sitúa en 2 y 3 mm respectivamente [21].

En este trabajo, reducir al máximo el espesor de la pared no es un asunto crítico. No obstante, la cantidad de material involucrada juega un papel determinante en el precio de la cámara. Atendiendo conjuntamente a criterios mecánicos, se opta finalmente por implantar una vasija cilíndrica. Las dimensiones de $50 \times 50 \times 40 \text{ cm}^3$ de la geometría rectangular se han visto avaladas sucesivamente por las simulaciones, por lo que deciden adaptarse a la nueva configuración. Un diseño técnico del detector de neutrones cósmicos se recoge en la Figura 4.1. El plano de lectura tiene una geometría cuadrada de dimensiones $35 \times 35 \text{ cm}^2$, por lo que sólo sucesos en el paralelepípedo formado por este plano, por ánodo y por cátodo serán registrados. El detector no será sensible a depósitos de energía en el resto del gas. La masa de helio natural dentro de este volumen fiducial es 34,6 g a 4 bar.

Respecto al material de la vasija, podría resultar interesante el empleo de PE, que jugaría el papel de moderador a la vez. Sin embargo, la alta permeabilidad al helio que este material presenta, en conjunción con la necesidad de un cierto nivel de estanqueidad que la cámara debe cumplir, motivan que esta opción quede descartada. Entre las otras dos alternativas, el acero y el aluminio, las diferencias que presentan no tienen una significancia trascendental, por lo que ambos elementos

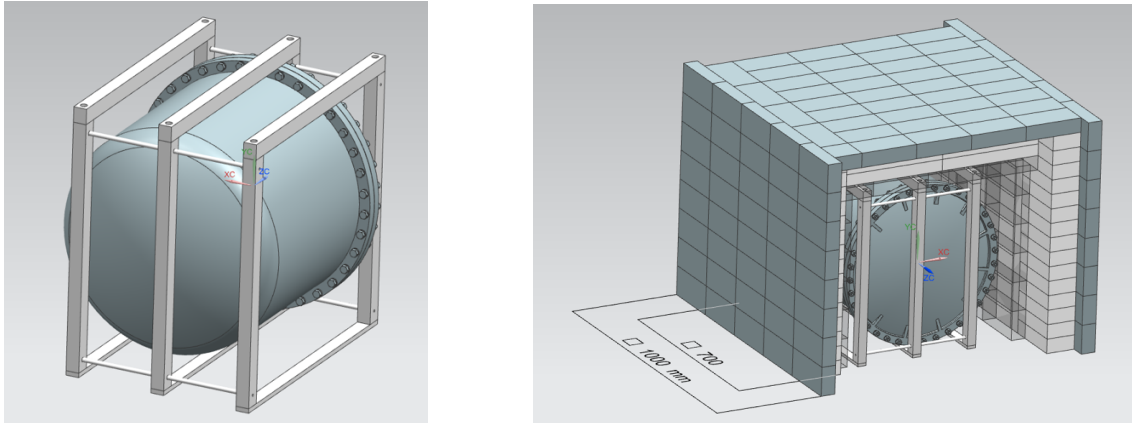


Figura 4.1 Diseño técnico del detector de neutrones cósmicos. **(Izquierda):** Imagen detallada de la vasija cilíndrica y de la estructura de barras donde descansa el techo del blindaje. **(Derecha):** Esquema del montaje, donde se muestra la disposición de las tres capas de blindaje (desde fuera hacia dentro del conjunto: plomo, PE y plomo), y el detector en el centro del armazón.

resultan adecuados. Finalmente, por razones ingenieriles y de mecanización se apuesta por un escenario híbrido: la vasija íntegra estará hecha de aluminio con un espesor 3 mm, y la tapa a través de la cual tiene lugar la entrada y salida de señales y de alimentación, de acero inoxidable. La brida, donde irá atornillada la unión entre la tapa y el resto de la cámara, también será de acero.

En relación con la presión, cuanto mayor es este parámetro, teóricamente mayor es el número de sucesos recogidos. El objetivo de incrementar la presión es aumentar la masa de helio y, por tanto, la eficiencia del detector. Sin embargo, debido a aspectos prácticos advertidos por el grupo a lo largo de su experiencia en este tipo de cámaras, la máxima presión a la que debe operarse el detector se sitúa en 4 bar. De esta forma, se ha adoptado una postura conservadora para poder disponer de un montaje que funcione de forma rutinaria.

En cuanto al blindaje, ya se ha discutido previamente el interés de incorporar un blindaje completo, tanto de plomo como de PE. Con esta estrategia, se consigue una mejor cobertura angular, pudiendo reducir la extensión que debe alcanzar la primera capa de plomo para interactuar con la radiación que incide bajo un cierto ángulo. Además, al incorporar capas de blindaje lateralmente, no es preciso simular las gammas ambientales, ya que el fondo natural se va a ver bloqueado, con seguridad, por estas placas. En términos de la distribución de material, se acuerda para el diseño del detector un espesor de 5 cm de plomo, seguido de un grosor de 10 cm de PE, y de una segunda capa de plomo de 5 cm. De esta forma, los neutrones, o bien colisionan con la primera cubierta de plomo, o bien con la segunda. Un esquema de las distintas capas de blindaje que conforman el montaje se exhibe en la Figura 4.2. Cabe mencionar que realmente la primera capa de plomo no va a ir pegada a la cámara, sino que es necesario dejar un hueco de ~ 5 cm tanto por arriba como por debajo de la misma para sacar la electrónica, la entrada y salida de gas, o las conexiones de la Micromegas. Para ello, será necesario hacer agujeros de entrada y de salida de unos pocos mm.

Para construir tal blindaje, se utilizarán ladrillos de plomo y bloques de PE disponibles en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC). El volumen que debe cubrir la capa de plomo más externa es $1000 \times 800 \times 1000 \text{ mm}^3$, el correspondiente al revestimiento de PE es $900 \times 750 \times 900 \text{ mm}^3$, y el análogo para la capa de plomo más interna es $700 \times 650 \times 700 \text{ mm}^3$. Los cálculos apuntan a que serán necesarios 3345,3 kg de plomo y 272,57 kg de PE [21]. Con ello, se comprueba que el espectro de pesos manejado en este detector se desvincula totalmente de los esquemas más comerciales.

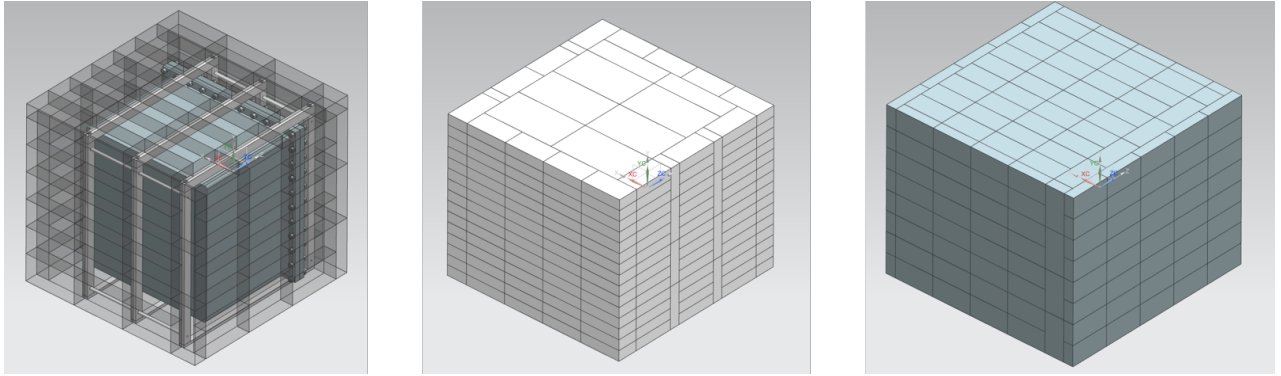


Figura 4.2: Esquema técnico de las distintas capas de material que conforman el blindaje completo del detector de neutrones cósmicos: 5 cm de plomo (**izquierda**), 10 cm de PE (**centro**) y 5 cm de plomo (**derecha**).

Para mitigar el riesgo de estabilidad de la estructura del blindaje, se incorpora un encofrado de 1 mm de aluminio antes de la primera capa de plomo. Análogamente, se idea una estructura de barras finas (Figura 4.1, izquierda) que soporte el peso del blindaje del techo, el cual asciende a 784,63 kg. La posición de las barras es tal que el inicio y final de los ladrillos coincide con la de estos perfiles. Además, el techo se apoya con los ladrillos de los laterales. Con este sistema adicional, la amenaza de que el blindaje se derrumbe se esfuma definitivamente.

4.2. Implementación de la geometría

Un paso clave en este trabajo fue la implementación del diseño del detector en REST a partir de planos técnicos. Esto envuelve la creación de la geometría del dispositivo y del blindaje circundante. Para ello, se utilizaron herramientas GDML (*Geometry Description Markup Language*) que proporciona el software [22]. Cabe mencionar que, a pesar de tratar de replicar al máximo el esquema definitivo, ciertas piezas de tornillería o juntas de entrada y salida de gases que se incluyen en el experimento real han decidido omitirse, ya que se considera que, en primera aproximación, estas estructuras no tienen un impacto importante en el número de partículas detectado.

En la Figura 4.3 aparece representada la geometría implementada. La vasija del detector consiste en un cilindro de aluminio de radio interno 250 mm, longitud 443 mm y espesor 3 mm. La cámara se apoya en un soporte de acero inoxidable en uno de sus extremos. En el otro lado se encuentran la tapa y el aro, piezas a su vez concebidas en acero. El plano de lectura del detector es un plano cuadrado de $35 \times 35 \text{ cm}^2$ formado por 10 canales de píxeles que definen 7 módulos separados por un *pitch* de 5 mm. El detector Micromegas se colocará pegado a la tapa para poder hacer cortes fiduciales. La estructura de barras que soporta el peso del techo del blindaje está constituida por 12 barras de 598 mm de longitud y 8 barritas acopladas más pequeñas, ambas de aluminio.

Un total de 7×10^6 neutrones cósmicos de alta energía y gammas cósmicas de alta energía, 2×10^7 neutrones cósmicos de baja energía y 5×10^7 gammas cósmicas de baja y media energía fueron simulados. La reducción de un orden de magnitud en el número de sucesos primarios para neutrones y gammas cósmicos de alta energía se vio motivada por el hecho de que en el rango de muy altas energías las simulaciones son muy costosas computacionalmente. Aplicando los valores de flujo recogidos en la Tabla 3.1, el número de eventos primarios equivale a un tiempo real de simulación de $\sim 2160,5 \text{ h}$ (neutrones cósmicos de alta energía), 7,20 h (gammas cósmicas de alta energía), 7,39 h (neutrones cósmicos de baja energía), 3,51 h (gammas cósmicas de baja energía) y 38,58 h (gammas cósmicas de energía media). Las partículas se lanzan con una distribución angular de $\cos^2(\theta)$ desde

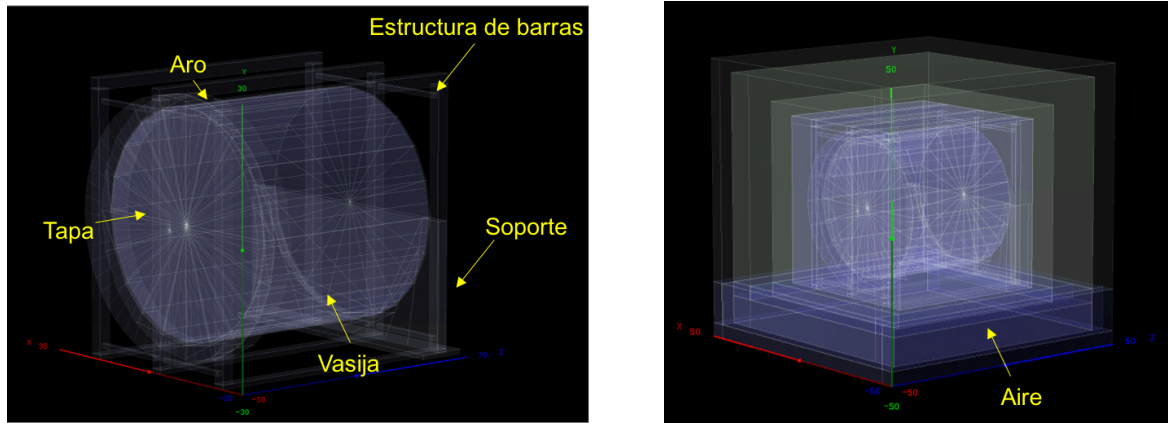


Figura 4.3: Implantación del diseño del detector de neutrones cósmicos en REST. **(Izquierda):** Geometría de la cámara y de la estructura de barras con sus correspondientes partes diferenciadas. **(Derecha):** Diseño completo del montaje con el detector inmerso en las tres capas de blindaje.

un plano rectangular de $3 \times 3 \text{ m}^2$ (puede considerarse infinito) situado sobre el detector a una distancia de 50 cm; esto es, justo encima del último blindaje de plomo.

A continuación, se explican algunos eventos representativos que acontecen en la cámara.

En términos de neutrones cósmicos primarios, se observan reacciones de alta energía mediadas por la interacción fuerte, como aquellas que acontecen en fuentes de espalación. Típicamente, se trata de cascadas hadrónicas, tales como las que tienen lugar en los rayos cósmicos. A esas energías extremadamente altas, es característica la aparición de piones. Si los piones son neutros, se producen fotones, mientras que, si son cargados, su decaimiento se traduce en un muón y un neutrino. Se comprueba que en el montaje, especialmente en la capa más externa del blindaje, se despliega una fenomenología muy rica y variada. La ionización, así como los procesos inelásticos y Compton, este último para gammas secundarias, son las interacciones que se ven favorecidas.

En la Figura 4.4 se observa un evento representativo de neutrones cósmicos de muy alta energía como suceso primario. En este ejemplo, un protón producido en la capa de plomo más próximo al detector penetra en el gas y lo ioniza. Este protón es el resultado de la interacción inelástica de otro protón, el cual se produce en la capa de PE a partir de la interacción elástica del neutrón inicial con el material hidrogenado. En el entramado de trazas, se distinguen gran cantidad de piones, neutrinos y antineutrinos, núcleos en retroceso, gammas que experimentan procesos Compton, y electrones. Destacan los neutrones secundarios que interaccionan inelásticamente con las estructuras que encuentran a su paso.

Si el evento primario es una gamma cósmica de alta energía, el detector se inunda de eventos, y resulta verdaderamente complicado dilucidar su origen. En este contexto, la creación de pares, la emisión de fotones de radiación de frenado, procesos de multiscattering o el efecto Compton son los fenómenos más observados. La Figura 4.5 exhibe un evento representativo de gammas cósmicas de muy alta energía como suceso primario. En él, un electrón de alta energía resultado de una interacción Compton en la vasija penetra en el medio de detección, y experimenta procesos de multiscattering, ionización y bremsstrahlung en el gas conformando una traza muy larga de miles de hits. La gamma que da lugar a este electrón proviene de un positrón que emite radiación de frenado en la capa de plomo más externa. Este patrón de interacción (creación de pares, bremsstrahlung) se propaga a lo largo de todo el detector hasta llegar a la gamma inicial, que experimenta producción de pares en el recubrimiento de plomo más externo.

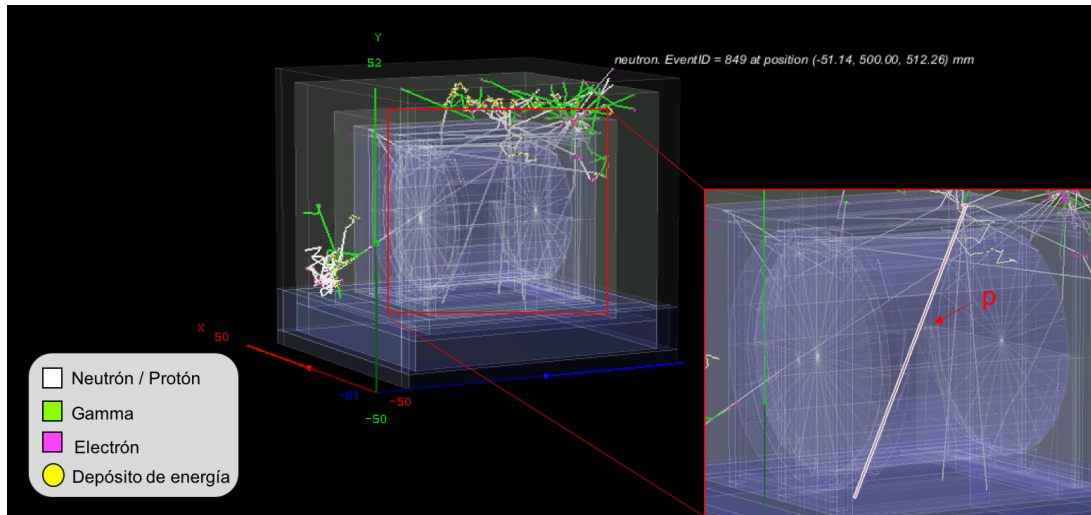


Figura 4.4: Evento representativo de neutrones cósmicos de muy alta energía como suceso primario.

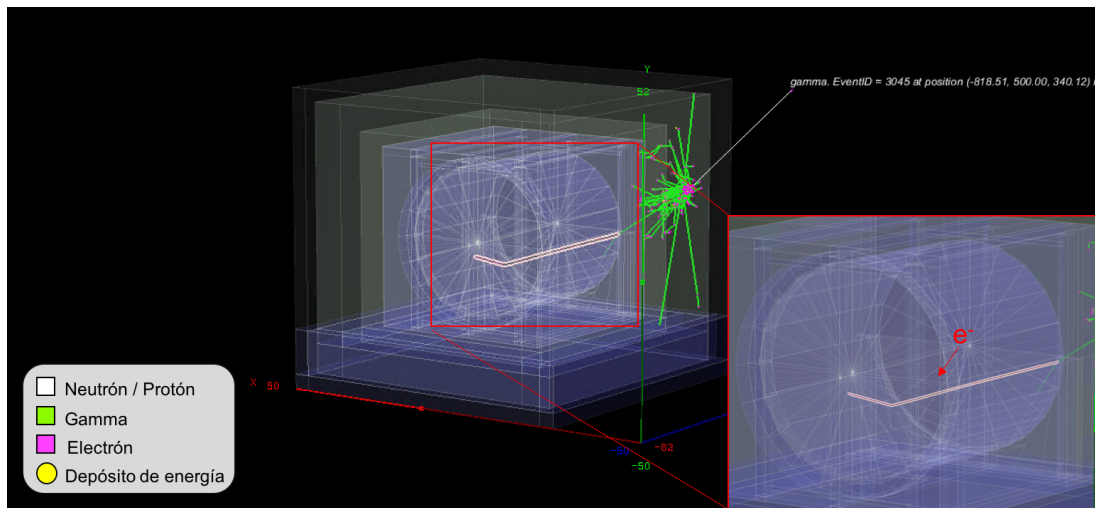


Figura 4.5: Evento representativo de gammas cósmicos de muy alta energía como suceso primario.

Antes de analizar la caracterización de observables y la respuesta del detector, se lleva a cabo la simulación de la calibración del mismo utilizando una fuente de ^{252}Cf y otra de ^{137}Cs , ambas con una actividad de $1\ \mu\text{Ci}$. El objetivo es establecer una comparación entre las prestaciones ofrecidas por el detector diseñado y por el comercial en el rango de energías de la calibración. El esquema comercial ofrece una sensibilidad a neutrones de $0,12\ \text{n}/(\text{s ng de } ^{252}\text{Cf a } 2\ \text{m})$, y un rechazo a gammas de 10^{-7} ¹. Teniendo en cuenta la actividad específica del ^{252}Cf ², esta sensibilidad a neutrones se traduce en una eficiencia absoluta del detector frente a estas partículas de $4,32 \times 10^{-4}$ en el régimen de energía característico de los neutrones de fisión, esto es, unos pocos MeV.

Para la calibración del detector diseñado, se lanzan 5×10^7 eventos iniciales de una fuente de ^{252}Cf y otra de ^{137}Cs con una distribución isótropa desde un punto situado a 2 m del centro del detector en la vertical, lo cual corresponde a 22,52 minutos de calibración para fuentes de $1\ \mu\text{Ci}$.

¹En las hojas de especificaciones del detector comercial no se ofrece información acerca del significado y de la metodología seguida para el cálculo de este parámetro.

²La actividad específica del ^{252}Cf es $2,314 \times 10^{12}\ \text{Bq/g}$ [23].

Detector diseñado calibración @ 4 bar	
Neutrones ^{252}Cf (sucesos/h)	5565 ± 122
Gammas ^{137}Cs (sucesos/h)	1388 ± 61
ϵ_n	$(1,04 \pm 0,02) \times 10^{-5}$
ϵ_γ	$(1,224 \pm 0,001) \times 10^{-5}$
GARRn	$1,172 \pm 0,026$

Tabla 4.1: Calibración del detector diseñado a 4 bar. Se muestran los sucesos recogidos por hora de calibración, la eficiencia absoluta del detector frente a neutrones y gammas, y el GARRn obtenido en este rango de energía. En el caso del ^{252}Cf se han lanzado sólo neutrones, y en el de la fuente de ^{137}Cs todas las posibles emisiones del isótopo. En consecuencia, la eficiencia absoluta frente a neutrones y gammas se calcula a partir del cociente entre eventos recogidos y lanzados, teniendo en cuenta que la fuente de ^{252}Cf emite 4 neutrones en cada fisión espontánea, y que el fotón de 661,6 keV del ^{137}Cs se produce el 85,1 % de las veces que tiene lugar la emisión.

La Tabla 4.1 recoge los resultados de la calibración. Se comprueba que la eficiencia absoluta del detector frente a neutrones y gammas en este rango de energía es semejante, y se sitúa en torno a $\sim 1 \times 10^{-5}$. Además, se verifica que la eficiencia absoluta del detector frente a neutrones es un orden de magnitud menor que la del comercial: $(1,04 \pm 0,02) \times 10^{-5}$ en el primero, frente a, tal y como se adelantaba, $4,32 \times 10^{-4}$ en el segundo. Esta discrepancia se vincula con factores geométricos relacionados con que el ángulo sólido que subtiende el punto generador es mayor en el detector comercial, ya que la longitud de este cilindro es 600 mm frente a los 443 mm del detector diseñado. Otro argumento que avala este desajuste viene dado por el hecho de que el espesor de la pared del detector comercial no es conocido. Si bien en el dispositivo diseñado la pared de la cámara tiene un grosor de 3 mm, posiblemente el esquema comercial disponga de una pared de mayor espesor para soportar la presión de 25 bar. En esta pared se inducen con una elevada probabilidad procesos inelásticos y de captura que aumentan la población de sucesos secundarios que alcanza el detector y, por tanto, la eficiencia del dispositivo comercial frente a neutrones. No obstante, se considera que el detector diseñado es competitivo en el rango de energía característico de la calibración. Cabe mencionar que en este régimen, el GARRn se sitúa en torno a la unidad. El rechazo a gammas que ofrece el detector comercial, 10^{-7} , no es directamente comparable a este rendimiento, ya que, se desconoce cómo se ha obtenido exactamente este factor.

Conocida la eficiencia del detector mediante simulaciones, es posible estimar cuántos neutrones y gammas se esperaría recoger en una calibración experimental típica de 10 minutos con fuentes de $1 \mu\text{Ci}$ en este dispositivo. Se detectarían $27,8 \pm 0,6$ neutrones y $231,30 \pm 0,18$ gammas, por lo que van a ser necesarias calibraciones de varias horas para sumar una cierta estadística, o acercarse más a la fuente. El fuerte descenso de neutrones frente a gammas viene motivado principalmente porque la fisión espontánea del ^{252}Cf ocurre únicamente el 3 % de las veces.

4.3. Respuesta del detector

En este apartado se revisa el resultado de las simulaciones arrojado por el detector, y se estudia el potencial de ciertos observables para conformar cortes topológicos. Los criterios de selección se definen como una serie de condiciones que deben satisfacer los observables de un evento para ser compatible con un suceso debido a neutrones cósmicos.

En la Figura 4.6 se muestra la energía depositada en el gas por sucesos causados por neutrones

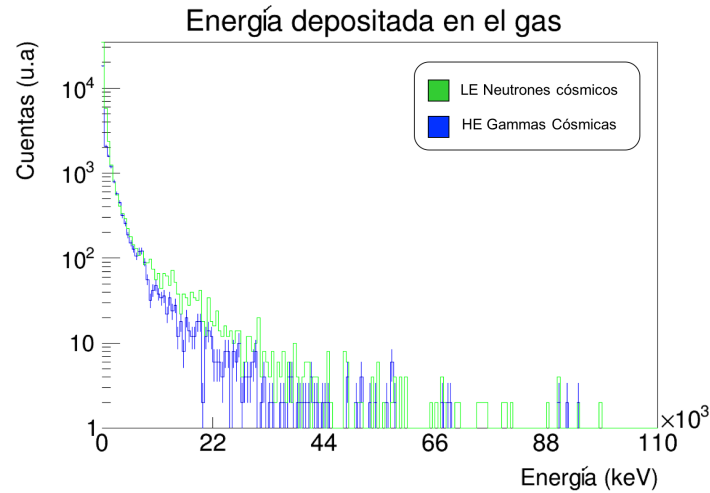


Figura 4.6: Energía depositada en el gas por neutrones cósmicos de baja energía (LE) y gammas cósmicas de alta energía (HE), en verde y azul respectivamente.

cósmicos de baja energía y por gammas cósmicas de alta energía, distribuciones que se enfrentan deliberadamente al corresponder a los rangos de energías más distantes dentro de cada tipo de sucesos. Se evidencia un claro solapamiento entre ambas poblaciones. Debido a la propia estructura del detector, las diferencias entre distribuciones serán más bien debidas a la estadística, que a la propia fuente. Cabe recordar que los neutrones interactúan en la cámara y blindaje mediante procesos inelásticos o de captura que originan gammas secundarias, y son estas partículas las que posteriormente depositan energía en el gas. Por ello, será difícil distinguir entre una fuente de neutrones y otra de gammas. En consecuencia, este observable no se postula como un candidato a conformar los criterios de selección, ya que conllevaría una reducción desmesurada de neutrones.

Un segundo observable de interés es el número de trazas. En la Tabla 4.2 se muestra el porcentaje de sucesos que deposita su energía en una, en dos, o en un mayor número de trazas.

Se comprueba que la interacción de sucesos causados por neutrones de baja energía tiene lugar principalmente en una traza. El motivo es que típicamente el núcleo de helio en retroceso acelerado como consecuencia de la interacción elástica libera su energía en un solo depósito de energía, que es registrado como una única traza. Análogamente, la mayor parte de eventos debidos a gammas de baja energía depositan su energía de forma puntual en una sola traza, ya que la probabilidad de que fotones secundarios experimenten una segunda interacción es baja. En cambio, a mayor energía, la probabilidad de múltiples interacciones y cascadas, en el blindaje, cámara o detector, es más alta, por lo que el número de trazas aumenta, tanto en el caso de neutrones como en el de gammas.

Número de trazas	1 (%)	2 (%)	3 ó más (%)
LE Neutrones cósmicos	$67,1 \pm 0,5$	$18,15 \pm 0,26$	$14,71 \pm 0,23$
HE Neutrones cósmicos	$49,43 \pm 0,19$	$21,26 \pm 0,12$	$29,31 \pm 0,14$
LE Gammas cósmicas	59 ± 5	23 ± 3	19 ± 3
ME Gammas cósmicas	$58,9 \pm 2,2$	$25,2 \pm 1,5$	$15,9 \pm 1,1$
HE Gammas cósmicas	$41,4 \pm 0,6$	$22,2 \pm 0,4$	$36,4 \pm 0,5$

Tabla 4.2: Porcentaje de sucesos que depositan su energía en una, en dos, o en un mayor número de trazas calculado con respecto al total de eventos que depositan su energía en el medio de detección. Se considera el conjunto formado por el detector y la estructura de blindaje.

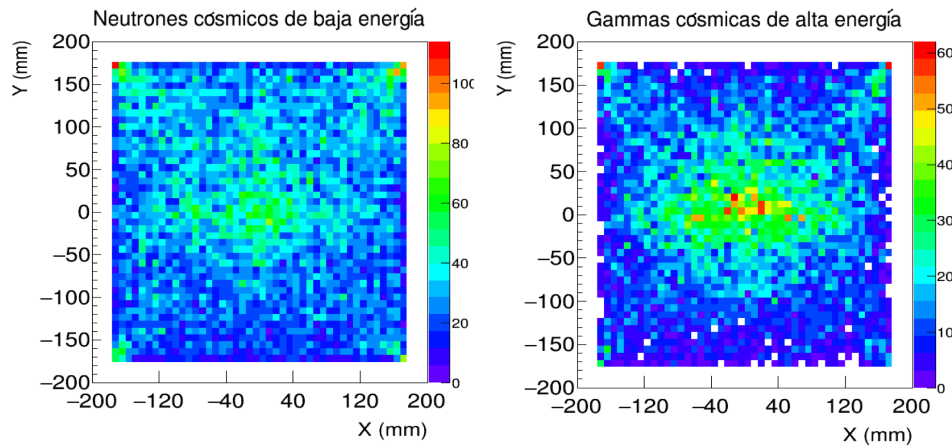


Figura 4.7: Posición media de los hits en el plano de lectura. **(Izquierda:)** Neutrones cósmicos de baja energía. **(Derecha:)** Gammas cósmicas de alta energía.

La Figura 4.7 representa la posición media de los hits en el plano de lectura de los sucesos originados por neutrones cósmicos de baja energía y por gammas cósmicas de alta energía. Se han elegido para comparar los dos patrones más diferentes. De ella se infiere que los eventos debidos a neutrones no están distribuidos uniformemente en la superficie del plano de lectura. En cambio, se percibe que los sucesos ocasionados penetran preferentemente en él por las esquinas, advirtiendo con ello una ligera acumulación de sucesos en estos ángulos. Dada la disposición de la Micromegas cuadrada en la tapa circular de la cámara, las esquinas son el punto en el que el plano de lectura está en contacto con la vasija y, por lo tanto, se detectan interacciones que provienen de la cámara. En el resto de puntos existe un volumen de gas en el que trazas cortas debidas a interacciones en la pared no serán registradas. En lo relativo a gammas, se describe un escenario semejante, aunque con una clara aglutinación de eventos en el centro del plano de lectura, ya que los sucesos originados por gammas cósmicas típicamente describen muchas trazas: una gamma interacciona y deposita energía en un punto, y a continuación se dispersa a otra gamma que puede que también deposite energía en otra traza. La posición media de estas trayectorias se sitúa en el centro. La longitud de las trazas de sucesos causados por neutrones cósmicos de baja energía es seguramente más pequeña, ya que, en términos de sección eficaz, es muy probable que el depósito de energía sea debida al retroceso del núcleo de helio en una interacción elástica, que deposita su energía localmente.

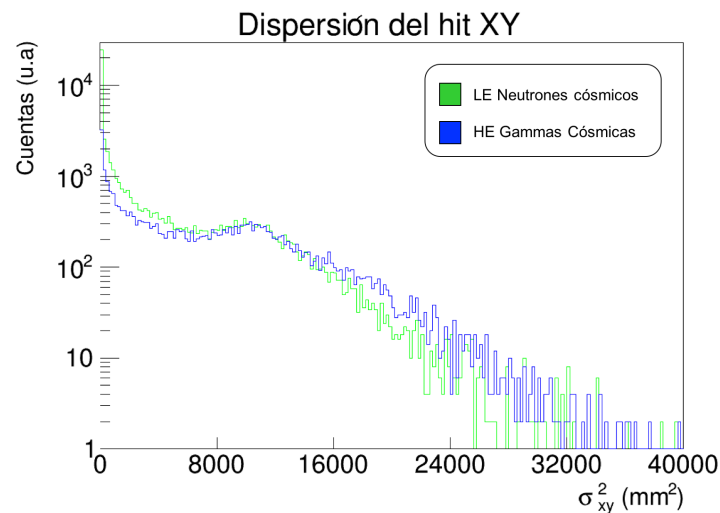


Figura 4.8: Dispersión del hit en el plano de lectura asociada a neutrones cósmicos de baja energía (LE) y a gammas cósmicas de alta energía (HE), en verde y azul respectivamente.

A fin de enriquecer y tratar de afinar los criterios de selección, se estudia la varianza en el plano xy , σ_{xy}^2 , que define la dispersión del evento en el plano de lectura. Este posible corte viene motivado por el hecho de que el retroceso nuclear causado por un choque elástico tiene una trayectoria de ionización corta, lo que minimiza su dispersión espacial. Este comportamiento se contrapone con el carácter continuo del proceso de ionización característico del electrón. La idea es que imponiendo un corte relativo al tamaño del suceso en el plano de lectura podría ser posible, no sólo discriminar electrones, sino también gammas energéticas que experimentan dispersión Compton, una interacción muy recurrente en la cámara que conlleva inherentemente una mayor dispersión. La Figura 4.8 presenta la dispersión del hit en el plano de lectura asociada a neutrones cósmicos de baja energía, y a gammas cósmicas de alta energía. Se comprueba que el patrón es muy parecido en ambos casos. A la izquierda del histograma, se observan sucesos con poca dispersión, que corresponden a eventos de baja energía y una sola traza, y conforme uno se desplaza hacia la derecha en el histograma se encuentra con la dispersión asociada a sucesos multitraza. Los eventos debidos a neutrones cósmicos de baja energía presentan una dispersión de hasta $\sim 250 \text{ cm}^2$ en el plano de lectura, situándose a su vez en este entorno la distribución del observable para sucesos causados por gammas cósmicas de alta energía. Dado que el tamaño del hit en el plano de lectura para neutrones y gammas iniciales es equiparable, resulta irrealizable discriminar un tipo de población de otro.

La caracterización realizada permite afirmar que no resulta factible aplicar cortes topológicos relativos a la energía depositada en el gas, al número de trazas, o a la dispersión del hit, ya que la distribución de estos observables se presenta extremadamente análoga en ambos tipos de partículas padre. Por tanto, en primera aproximación no parece haber ningún corte favorecido. En consecuencia, dado el solapamiento de observables advertido, el factor clave en este trabajo va a ser conocer debidamente el porcentaje que los neutrones cósmicos representan del total de sucesos que alcanza el detector. En la Tabla 4.5 se recogen los resultados arrojados por las simulaciones a 4 bar en términos de número de sucesos por unidad de tiempo cuando no se agrega la estructura de plomo, PE y plomo concebida al esquema del detector, y cuando se incorpora esta configuración.

	@ 4 bar	
sucesos/hora	Sin blindaje	Con blindaje
Neutrones cósmicos de alta energía	$7,89 \pm 0,03$	$65,74 \pm 0,17$
Neutrones cósmicos de baja energía	1114 ± 8	3730 ± 11
Gammas cósmicas de baja energía	9910 ± 50	63 ± 4
Gammas cósmicas de media energía	2319 ± 8	$30,8 \pm 0,9$
Gammas cósmicas de alta energía	4880 ± 11	1880 ± 16
Sucesos esperados/h	18237 ± 55	5764 ± 28
% Neutrones	$6,15 \pm 0,05$	$65,8 \pm 0,5$
% Gammas	$93,8 \pm 0,4$	$34,2 \pm 0,3$
ϵ_n	$(2,8 \pm 0,1) \times 10^{-4}$	$(2,16 \pm 0,01) \times 10^{-2}$
ϵ_γ	$(7,510 \pm 0,001) \times 10^{-3}$	$(1,959 \pm 0,002) \times 10^{-3}$
GARRn	$2,64 \pm 0,01$	$0,305 \pm 0,003$

Tabla 4.3: Sucesos por hora recogidos por el detector de neutrones cósmicos diseñado a 4 bar. Se representa la estadística cuando la cámara no dispone de blindaje, y cuando se incorpora la estructura de plomo, PE y plomo ideada. Se muestran los eventos esperados para el detector en una hora, el porcentaje de neutrones y gammas, la eficiencia absoluta del detector frente a estas partículas y el GARRn.

Por un lado, el porcentaje de sucesos debidos a neutrones se eleva en un factor 10 al incorporar al detector la estructura dedicada a la moderación y al blindaje. De esta forma, se verifica que en el PE los neutrones se moderan, o bien hasta energías del orden del meV, o bien hasta el entorno del MeV, y que en el plomo se genera una gran cantidad de productos secundarios que ionizan el medio de detección. Se comprueba que la eficiencia absoluta del dispositivo frente a neutrones aumenta dos órdenes de magnitud al incorporar el blindaje. Tal y como se observa, en este trabajo la contribución dominante a la detección neutrónica la van a constituir neutrones cósmicos de baja energía, ya que la tasa de llegada de su análogo en el régimen de altas energías es reducido.

Cabe mencionar que, con la información disponible, no es posible asegurar en qué magnitud depositan las partículas su energía, y, sobre todo, en qué estructura. La razón es que los observables manejados únicamente ofrecen información de la energía absorbida en cada capa para aquellos sucesos que han depositado energía en el volumen sensible. No obstante, limitándose al porcentaje de eventos que ha alcanzado el gas, se puede afirmar que todas las especies de este conjunto depositan la mayor parte de su energía en la primera y segunda capa de plomo. En concreto, los sucesos debidos a neutrones cósmicos lo hacen en el revestimiento inicial de plomo. Respecto al comportamiento de las gammas cósmicas, se observa que, de acuerdo con la intuición, la energía depositada por sucesos causados por gammas de alta energía es varios órdenes de magnitud superior a la cedida por aquellos eventos producidos por gammas de energías más bajas. Además, por consideraciones relativas a la energética, los ocasionados por gammas de alta energía depositan la mayor parte de su energía en la segunda capa de plomo. Remarcar que lo justamente descrito no es extrapolable al total de eventos simulados. No obstante, se considera que esta interpretación permite dibujar un primer esbozo de la magnitud de interacción que acontece en cada revestimiento.

Por otro lado, la incorporación de blindaje conlleva una reducción muy significativa del fondo de gammas. Tal es así, que puede considerarse que los sucesos debidos a gammas de baja y media energía depositan prácticamente la totalidad de su energía en el blindaje. La interacción dominante en este régimen de energía es la dispersión Compton y la creación de pares, cuyos productos acaban atenuándose virtualmente en su totalidad por la estructura dedicada al blindaje. Con ello, la eficiencia absoluta del detector frente a gammas disminuye un factor ~ 4 . Sin embargo, una fracción no despreciable de los sucesos debidos a gammas de alta energía todavía alcanzan el gas como consecuencia de su alto poder de penetración. Esta contribución es la dominante en el porcentaje de gammas detectado sin filtrar, que asciende al $\sim 30\%$. Del total de eventos esperados en un hora, un $65,8\%$ de ellos, en concreto, 3793 ± 22 son sucesos causados por neutrones cósmicos. En este punto, el GARRn se sitúa por debajo de la unidad en $0,305 \pm 0,003$. Los resultados obtenidos se consideran competitivos para las condiciones de medida a las que pretende destinarse el detector.

No obstante, a fin de mejorar las prestaciones reportadas, se define un prisma matemático rodeando al plano de lectura. La distancia a las paredes de este prisma fiducial (d_w) es un observable que sirve para conocer la distancia de un evento al centro del detector. Dado que el plano de lectura es un cuadrado de $350 \times 350 \text{ mm}^2$, $d_w \sim 0$ implica que el evento contiene hits muy próximos a las paredes del prisma, y $d_w \sim 175 \text{ mm}$ corresponde a eventos recogidos en el centro del plano de lectura. La idea detrás de explorar este observable radica en el hecho de que las gammas secundarias que consiguen llegar al gas tras atravesar las capas de blindaje interaccionan con gran probabilidad en la pared de la cámara dando lugar, o bien a la emisión de rayos X o de fluorescencia, o bien a un chorro de electrones secundarios que depositan su energía en unos pocos mm. En consecuencia, para separar eventos tipo neutrón inicial de eventos tipo gamma inicial es posible despreciar aquellos que tienen lugar en la vasija definiendo un corte relativo a este observable, $d_w > 5 \text{ mm}$. Aunque los neutrones cósmicos también pueden ocasionar gammas secundarias que interaccionan de la misma manera, tal y como se va a ver a continuación, la aplicación de un corte atendiendo a este parámetro elimina un mayor número de sucesos debidos a gammas cósmicas que a neutrones.

Distancia a la pared	$d_w < 5 \text{ mm}$ (%)
LE Neutrones cósmicos	$56,3 \pm 0,5$
HE Neutrones cósmicos	$49,35 \pm 0,19$
LE Gammas cósmicas	94 ± 7
ME Gammas cósmicas	95 ± 3
HE Gammas cósmicas	$96,2 \pm 0,8$

Tabla 4.4: Porcentaje de sucesos que depositan energía en los píxeles que hacen borde en el plano de lectura, $d_w < 5 \text{ mm}$. Dicho porcentaje se calcula con respecto al total de eventos que depositan su energía en el medio de detección. Se considera el conjunto formado por el detector y la estructura de blindaje.

En la Tabla 4.4 se muestra el porcentaje de sucesos que depositan energía en los píxeles que hacen borde en el plano de lectura, $d_w < 5 \text{ mm}$. Se verifica que más del 90 % de los sucesos debidos a gammas cósmicas tienen lugar en la vasija y depositan su energía en trazas muy cortas en el límite del plano de lectura. Este porcentaje desciende al $\sim 50 \%$ para sucesos ocasionados por neutrones cósmicos. En consecuencia, se comprueba que este observable tiene el potencial de constituir un criterio de discriminación competitivo.

En la Tabla 4.5 se presentan los resultados reportados por las simulaciones a 4 bar sin aplicar el corte relativo a la distancia a la pared del prisma fiducial, y haciéndolo. A la luz de los resultados, se corrobora la efectividad del corte relativo a la distancia a la pared en la tarea de discriminación. Con este criterio, el fondo debido a gammas desciende hasta niveles muy residuales, incluso en el régimen de altas energías. De hecho, la discriminación del corte fiducial aplicado a gammas asciende al $\sim 95 \%$. Con esta estrategia, la eficiencia absoluta del detector frente a gammas disminuye dos órdenes de magnitud respecto al valor que adquiere sin la aplicación del corte, y la eficiencia absoluta

@ 4 bar			
Con blindaje			
Sucesos/hora	Sin corte	Corte $d_w > 5 \text{ mm}$	Discriminación del corte (%)
Neutrones cósmicos de alta energía	$65,74 \pm 0,17$	$28,61 \pm 0,12$	$56,5 \pm 0,4$
Neutrones cósmicos de baja energía	3730 ± 11	1630 ± 15	$56,2 \pm 0,8$
Gammas cósmicas de baja energía	63 ± 4	$3,7 \pm 1,0$	94 ± 9
Gammas cósmicas de media energía	$30,8 \pm 0,9$	$1,40 \pm 0,19$	95 ± 4
Gammas cósmicas de alta energía	1880 ± 16	95 ± 4	$94,9 \pm 1,2$
Sucesos esperados/h	5764 ± 28	1761 ± 15	
% Neutrones	$65,8 \pm 0,5$	$94,3 \pm 1,2$	
% Gammas	$34,2 \pm 0,3$	$5,68 \pm 0,22$	
ϵ_n	$(2,16 \pm 0,01) \times 10^{-2}$	$(9,43 \pm 0,04) \times 10^{-3}$	
ϵ_γ	$(1,95 \pm 0,16) \times 10^{-3}$	$(9,9 \pm 0,4) \times 10^{-5}$	
GARRn	$0,305 \pm 0,003$	$(1,05 \pm 0,04) \times 10^{-2}$	

Tabla 4.5: Sucesos por hora recogidos por el detector de neutrones cósmicos considerando la estructura de blindaje concebida. Se recogen los resultados sin y con la aplicación del corte relativo a la distancia a la pared del prisma fiducial, $d_w > 5 \text{ mm}$, y el factor de rechazo de dicho corte calculado como la población de sucesos obtenida sin cortes respecto a aquella que se recoge aplicándolo, normalizando respecto al primer conjunto de eventos. Se muestran los sucesos esperados para el detector en una hora, el porcentaje de neutrones y de gammas, la eficiencia absoluta frente a estas partículas y el GARRn.

frente a neutrones lo hace análogamente en un orden. Con la aplicación del corte, el GARRn desciende un orden de magnitud frente al valor que adquiere el parámetro sin filtrar. No obstante, el factor de discriminación del corte para eventos debidos a neutrones cósmicos se sitúa en torno al $\sim 56\%$, por lo que con él se están desechando más de la mitad de los sucesos de interés. El motivo de este fuerte descenso se vincula con la existencia de una población de productos secundarios debidos a neutrones cósmicos con unas propiedades muy similares a los originados por gammas.

En este punto, es preciso recordar que, a diferencia de los vetos, donde es necesario identificar específicamente los neutrones para después eliminar cualquier depósito de energía que estas partículas produzcan en el volumen sensible, la pretensión de la operación del detector de neutrones cósmicos es calcular con exactitud el flujo de estas partículas. Es decir, con este dispositivo se busca conocer cuántos neutrones puede esperar IAXO u otro experimento, no reconocerlos explícitamente. El compromiso entre el número de sucesos debidos a neutrones detectados y el rechazo a gammas revela que en este contexto reducir en un factor tan considerable la estadística de neutrones a fin de elevar el porcentaje de estas partículas detectado no constituye una estrategia favorecida. En general, para la tarea a la que se pretende destinarse el detector basta con conocer con precisión el total de sucesos esperado y el porcentaje que los neutrones representan de este conjunto.

El estudio de los observables explicados lleva a la conclusión de que no se pueden utilizar criterios de selección para discriminar entre las dos poblaciones de eventos. No obstante, resulta lícito destacar la utilidad del observable correspondiente a la distancia a la pared del prisma fiducial para discriminar sucesos debidos a neutrones de aquellos ocasionados por gammas. Si el objetivo del detector fuese identificar los primeros, el estudio de este observable resultaría claramente de interés. La explotación de este criterio requeriría de un análisis más exhaustivo que pasa por la implantación de un plano de lectura circular que se adaptase a la forma exacta de la tapa de la vasija. De esta forma, idealmente no habría un volumen de gas en el que las trazas cortas producidas en la vasija no serían registradas. Cabe mencionar que estos planos pixelizados existen. Sin embargo, en una primera etapa de caracterización del detector se debe considerar la disponibilidad de materiales en el laboratorio. A día de hoy, se planea trabajar con un plano de lectura cuadrado ya existente.

A fin de plantear una comparación entre el detector diseñado y el comercial en el rango cósmico, un total de 5×10^6 neutrones y gammas cósmicos de alta energía, y 7×10^6 neutrones cósmicos de baja energía y gammas cósmicas de baja y media energía fueron simulados en el esquema comercial. Aplicando los valores de flujo recogidos en la Tabla 3.1, el número de sucesos primarios equivale a un tiempo real de simulación de $\sim 1543,21$ h (neutrones cósmicos de alta energía), 5,14 h (gammas cósmicas de alta energía), 2,59 h (neutrones cósmicos de baja energía), 0,49 h (gammas cósmicas de baja energía) y 5,40 h (gammas cósmicas de energía media). Las partículas se lanzan con una distribución angular de $\cos^2(\theta)$ desde una plano rectangular de 3×3 m² (puede considerarse infinito) situado justo encima del detector. Los resultados de las simulaciones se presentan en la Tabla 4.6, donde, a fin de facilitar el cotejo con el dispositivo diseñado, se vuelven a mostrar las prestaciones del último sin la aplicación de cortes y con la estructura de blindaje concebida.

Se comprueba que el total de sucesos esperados por hora en el detector diseñado se ve multiplicado en un factor ~ 3 respecto a la estadística ofrecida por el comercial. De este conjunto, el porcentaje de eventos causado por neutrones cósmicos en el dispositivo ideado se eleva en un factor ~ 15 respecto al esquema comercial, y el parámetro análogo debido a gammas cósmicas disminuye en un factor ~ 3 . Este comportamiento justifica el potencial de la estructura de blindaje propuesta para aumentar la sensibilidad del dispositivo a neutrones en el rango cósmico. Con todo, la eficiencia absoluta del detector diseñado frente a neutrones es dos órdenes de magnitud mayor que la del comercial. Por su parte, la eficiencia absoluta del dispositivo aquí descrito frente a gammas cósmicas reporta a su vez un aumento de un orden de magnitud frente al esquema comercial. En cómputo

Sucesos/h	Detector comercial @ 25 bar	Detector diseñado @ 4 bar con blindaje y sin cortes
Neutrones cósmicos de alta energía	$0,248 \pm 0,013$	$65,74 \pm 0,17$
Neutrones cósmicos de baja energía	87 ± 6	3730 ± 11
Gammas cósmicas de alta energía	1527 ± 56	63 ± 4
Gammas cósmicas de media energía	164 ± 6	$30,8 \pm 0,9$
Gammas cósmicas de baja energía	142 ± 5	1880 ± 16
Sucesos esperados/h	1921 ± 57	5764 ± 28
% Neutrones	$4,5 \pm 0,3$	$65,8 \pm 0,5$
% Gammas	95 ± 7	$34,2 \pm 0,3$
ϵ_n	$(1,09 \pm 0,04) \times 10^{-4}$	$(2,16 \pm 0,01) \times 10^{-2}$
ϵ_γ	$(3,80 \pm 0,08) \times 10^{-4}$	$(1,95 \pm 0,16) \times 10^{-3}$
GARRn	$3,503 \pm 0,007$	$0,305 \pm 0,003$

Tabla 4.6: Sucesos por hora recogidos por el detector comercial a 25 bar en el rango cósmico. Se muestran los sucesos esperados por el detector en una hora, el porcentaje de neutrones y gammas, la eficiencia absoluta del dispositivo frente a estas partículas y el GARRn. Por conveniencia, se vuelven a mostrar los resultados obtenidos en este régimen de energías por el detector diseñado considerando la estructura de blindaje y sin la aplicación de cortes fiduciales.

to general, el GARRn del detector diseñado es un orden de magnitud menor que el del comercial. En consecuencia, queda comprobado que en este trabajo se ha concebido un detector claramente competitivo con el comercial en el rango cósmico. En comparación con la inversión que supondría hacer uso de las alternativas ofrecidas en el mercado para la detección de neutrones cósmicos, la fabricación propia del diseño descrito en esta memoria por parte del grupo con la tecnología y herramientas conocidas por éste, conllevará una importante reducción del gasto económico que el grupo debe sufragar, disponiendo al mismo tiempo de prestaciones competentes para las condiciones de medida. Además, se ha comprobado que con este dispositivo es posible recabar un gran volumen de información sobre el flujo de gammas cósmicas si éste se opera sin blindaje.

Capítulo 5

Conclusiones

Este Trabajo Fin de Máster ha concluido con el diseño sólido de un detector de neutrones cósmicos basado en planos de lectura pixelizados mediante técnicas de simulación. Dicho dispositivo utiliza helio natural como volumen sensible. La memoria ha comenzado contextualizando y motivando la necesidad imperiosa de disponer de esta tecnología en el marco del proyecto IAXO, ya que estudios previos realizados en este contexto relativos al modelo de fondo han indicado que muones y neutrones cósmicos constituyen la contribución más importante. El nivel de fondo de neutrones cósmicos, debido a la propia naturaleza de su interacción, se perfila como el factor dominante, incluso por encima del de muones cósmicos tras una tarea de discriminación.

Dada la falta de recursos disponibles en el ámbito comercial para la detección de neutrones de alta energía, resultó conveniente diseñar desde cero un detector para la detección de estas partículas. Con la operación de este dispositivo se pretende conocer el flujo real de estas partículas, y con ello mejorar la estimación de la eficiencia del sistema de vetos actual. Bajo el propósito de mitigar las contrariedades típicas que caracterizan la operación de un detector de neutrones, a saber, la baja estadística y la interferencia con un fondo de radiación gamma, ha sido preciso concebir un sistema debidamente estudiado que optimizase la detección neutrónica. Dicha estructura está compuesta por materiales con una función muy marcada. Por un lado, se incorpora al diseño del detector PE bajo la pretensión de moderar neutrones hasta las regiones claramente favorecidas en términos de la sección eficaz del helio. Por otro lado, se agrega un cierto espesor de plomo a fin de atenuar la radiación electromagnética y de maximizar la producción de secundarios. Tomando como referencia un modelo comercial, se han llevado a cabo simulaciones encaminadas a conformar un diseño del detector. A través de configuraciones básicas que abarcaban desde una o dos láminas, hasta un blindaje completo de plomo con láminas superpuestas en una geometría paralelepípeda, se ha dedicado un gran volumen de esfuerzo a estudiar las interacciones que acontecían en las configuraciones propuestas. Con ello, se ha sido capaz de entender las limitaciones de los sucesivos esquemas y de proponer soluciones a tales restricciones.

De esta forma, tras reflexionar acerca de cuestiones ingenieriles con el objetivo de disponer de un conjunto mecanizable y accesible económicamente, se ha forjado un diseño del detector. La vajija del mismo consiste en un cilindro de aluminio de radio interno 250 mm, longitud 443 mm y espesor 3 mm que se apoya en un soporte de acero inoxidable en uno de sus extremos. En el otro lado se encuentran la tapa y el aro de la cámara, ambos de acero. El esquema dispone de tres capas de blindaje rodeando por completo al detector. Comenzando desde el exterior al centro del montaje, se integran 5 cm de plomo, 10 cm de PE y 5 cm de plomo. El peso del blindaje del techo lo soporta una estructura de barras de aluminio.

La caracterización de observables ha hecho evidente que no se disponen de cortes topológicos competitivos para discriminar neutrones de gammas sin una reducción desmesurada de los

primeros. El detector reporta las siguientes prestaciones sin filtrar. Por un lado, se han recogido (3793 ± 22) sucesos/hora causados por neutrones cósmicos. Esta estadística se considera competitiva y cumple las expectativas fijadas al inicio del trabajo. El porcentaje de neutrones detectados se eleva al $(65 \pm 0,5) \%$ y el de gammas alcanza el $(34,2 \pm 0,3) \%$. Con ello, el GARRn se sitúa en $0,305 \pm 0,003$. Se ha comprobado que este parámetro puede descender un orden de magnitud aplicando el corte topológico relativo a la distancia a la pared del prisma fiducial. En este contexto, la disyuntiva se ha centrado entre una mayor acumulación de estadística o la aplicación de métodos de discriminación que rechacen un gran número de neutrones. No obstante, dado que la finalidad de este trabajo es medir el flujo de neutrones cósmicos con precisión, el número de partículas detectado juega un papel dominante en este balance. En consecuencia, el criterio de selección ha acabado descartándose considerando los planos de lectura cuadrados disponibles actualmente.

A día de hoy, el objetivo prioritario del grupo de investigación se centra en aumentar la capacidad de rechazo de IAXO a señales debidas al fondo de neutrones cósmicos. Se ha demostrado que el detector aquí diseñado es competitivo con el comercial tomado como referencia, y que tiene el potencial para medir y caracterizar debidamente el flujo de estas partículas. En conjunción con los vetos activos, este dispositivo contribuirá a alcanzar el nivel de fondo objetivo del experimento.

El futuro del detector comprende la construcción del detector por parte del grupo. Un presupuesto de primer orden de magnitud para la cámara cilíndrica se sitúa en 14.600 €+IVA. La puesta en marcha del dispositivo atañe cuestiones ingenieriles típicas que abarcan desde los asuntos más estructurales, tales como el alzamiento de las tres capas de blindaje, hasta aquellos relativos a la electrónica de lectura o la gestión de los puertos de entrada y de salida de los gases. Se pretende obtener certificado para tener la cámara validada a sobrepresión. A continuación, tendrá lugar la caracterización del detector y la evaluación de su funcionamiento, así como la optimización de los parámetros de cada uno de los sistemas involucrados. Una vez completado este procedimiento, el conjunto podría utilizarse en DESY, emplazamiento del proyecto IAXO.

En este trabajo se ha determinado como geometría favorecida una cilíndrica con volumen de detección de ~ 87 L con un plano de lectura pixelizado de $35 \times 35 \text{ cm}^2$. Con estas dimensiones, el detector diseñado se aleja claramente de los cánones más estandarizados. Dejando por un momento de lado restricciones económicas o de fabricación que pudiesen aflorar, una opción válida para aumentar la estadística del proceso de detección sería implementar una cámara de captación de dimensiones mayores. Como es conocido, si se incrementa el volumen sensible, la probabilidad de interacción se multiplica en la debida proporción. Otra estrategia encaminada a maximizar la eficiencia del dispositivo frente neutrones es el aumento de la presión. Teóricamente, cuanto mayor es la presión, mayor es la probabilidad de detección. Sin embargo, la alta presión dificulta la fabricación del detector, por lo que en la práctica no es recomendable mecánicamente trabajar más allá de 4 bar. Olvidándose de este compromiso, con mayor dotación económica y recursos ingenieriles se podría tratar de alcanzar la presión manejada típicamente en detectores comerciales, ~ 20 bar.

Por otra parte, el método de operación de este detector consiste en medir el flujo de neutrones al aire libre. En consecuencia, el dispositivo debe ser portátil. Para ello, a medio-largo plazo es imprescindible idear un carro móvil. Además, se podría pensar en una granja de detectores que operasen en conjunto. Con esta estrategia no sólo se conseguiría aumentar el volumen expuesto, sino que también se podría comparar la fenomenología observada por los distintos dispositivos y hacer una combinación estadística de los datos reportados por todos.

Bibliografía

- [1] **Planck Collaboration.** N. Aghanim, C. Armitage-Caplan *et al.* Planck 2013 Results XVI. Cosmological Parameters. *Astron Astrophys*, 571:A16, 2014.
- [2] Hai-Yang Cheng. The Strong CP problem revisited. *Physics Reports*, 158(1):1-89, 1988.
- [3] Steven Weinberg. A new light boson? *Physical Review Letters*, 40(4):223, 1978.
- [4] I.G. Irastorza. Hunting the axion. *Rev. Real Academia de Ciencias Zaragoza*, 69:37–78, 2014.
- [5] I.G. Irastorza *et al.* The International AXion Observatory (IAXO). Letter of Intent to the CERN SPS Committee, 2013.
- [6] **IAXO Collaboration.** BabyIAXO Experiment Proposal to the DESY PRC, 2019.
- [7] E. Ruiz. Ultra-low background Microbulk micromegas X-ray detectors for Axion searches in IAXO and BabyIAXO. Tesis Doctoral, 2019.
- [8] L. Obis. Estudio de fondo y señal en BabyIAXO, prototipo del experimento IAXO (International AXion Observatory). Trabajo Fin de Máster, 2020.
- [9] Arktis Radiation Detection Systems. Gamma and Neutron Detectors. https://www.arktis-detectors.com/fileadmin/user_upload/ARK-S670e-FTND-0818.pdf
- [10] M. Tanabashi *et al.* Review of particle physics. *Phys. Rev. D*, 98:030001, Aug 2018. 15, 16, 2018.
- [11] P. S. Hauge *et al.* *IBM J. Res. Dev.*, 40(1), pp 19-39, 1996.
- [12] W.T. Crane y P.M. Baker. Neutron detectors. *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials*, 13, 1-28, 1998.
- [13] R. Chandra *et al.* Fast neutron detection with pressurized ^4He scintillation detectors. *Journal of Instrumentation*, 7, 3, C03035, 2012.
- [14] National Nuclear Data Center (NNDC)- Brookhaven National Laboratory.
- [15] E. Aguayo *et al.* Cosmic ray interactions in shielding materials. *Pacific Northwest National Laboratory*, 2011.
- [16] XCOM: Photon Cross Sections Database, National Institute of Standards and Technology (NIST).
- [17] ROOT. <https://root.cern.ch/>. 2021
- [18] S. Agostinelli *et al.* Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 506(3):250 – 303, 2003.
- [19] T. R. Kouzes *et al.* Neutron detection gamma ray sensitivity criteria. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 654, 1, 412-416. 2011.
- [20] Cosmic rays at Earth, Researcher's Reference and Data Book Manual *Elsevier*. 2001.
- [21] J. Castel. Comunicación interna. 2021.
- [22] Geometry Description Markup Language (GDML). <https://gdml.web.cern.ch/GDML/> 2017.
- [23] R. C. Martin *et al.* Production, distribution and applications of californium-252 neutron sources. *Applied Radiation and Isotopes* 53,4-5, 785-792. 2000.